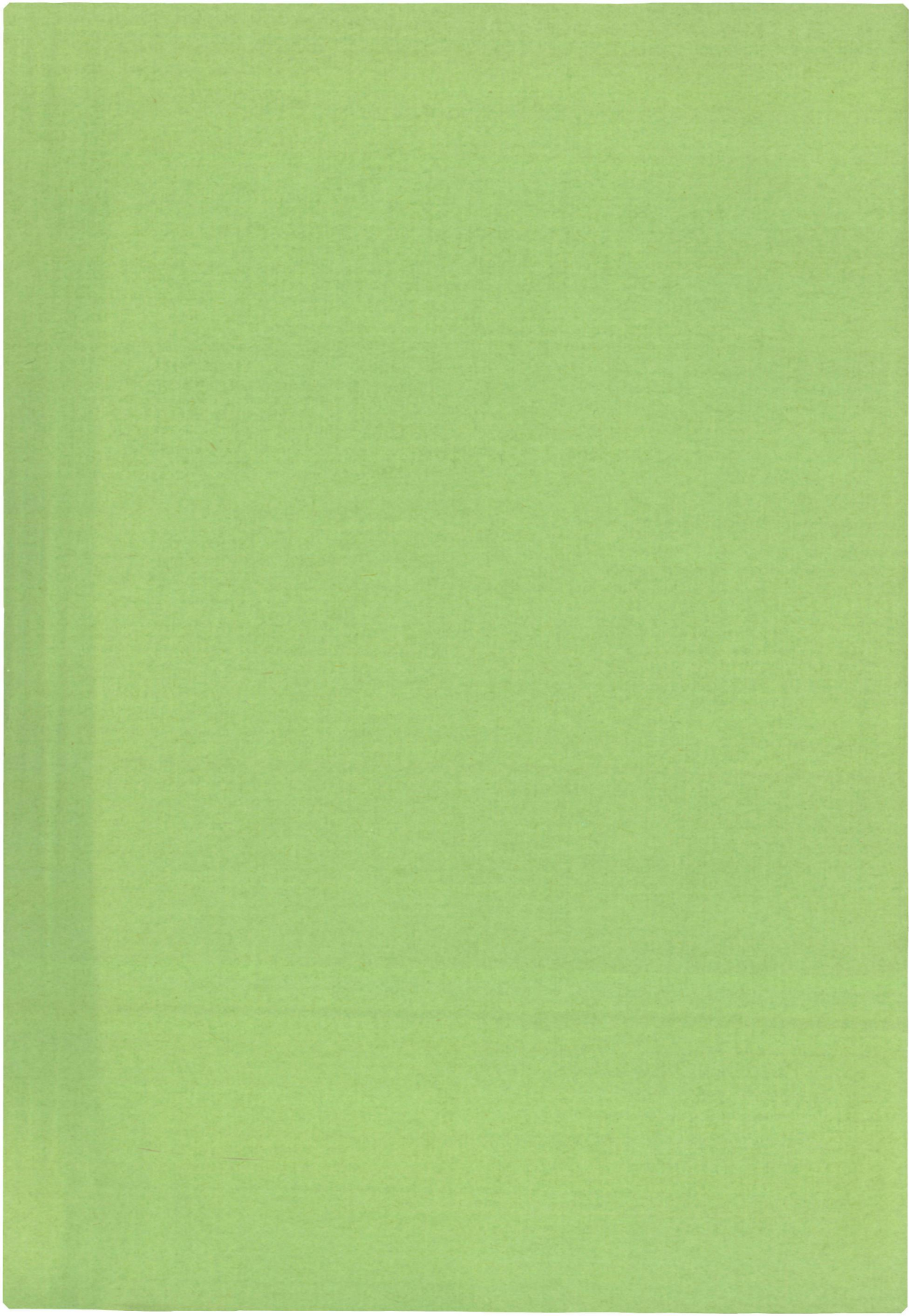


1694

# **SIMULATIE VAN EEN MENS-MACHINE SYSTEEM**

**JAN H. G. KLABBERS**



**JAN H.G. KLABBERS**







# **SIMULATIE VAN EEN MENS-MACHINE SYSTEEM**

PROMOTOR : PROF. DR. G. BRENNINKMEIJER  
, CO-REFERENT : DR. A. F. G. HANKEN

# **SIMULATIE VAN EEN MENS-MACHINE SYSTEEM**

**EEN SYSTEEMPSYCHOLOGISCHE BENADERING**

## **PROEFSCHRIFT**

**TER VERKRIJGING VAN DE GRAAD VAN DOCTOR IN  
DE SOCIALE WETENSCHAPPEN AAN DE KATHOLIEKE  
UNIVERSITEIT TE NIJMEGEN, OP GEZAG VAN DE RECTOR  
MAGNIFICUS DR. G. BRENNINKMEIJER, HOOGLERAAR IN  
DE FACULTEIT DER SOCIALE WETENSCHAPPEN, VOL-  
GENS BESLUIT VAN DE SENAAT IN HET OPENBAAR  
TE VERDEDIGEN OP VRIJDAG 30 JUNI 1972, TE 14.00 UUR  
PRECIES.**

**door**

**J A N H. G. K L A B B E R S**

**GEBOREN TE SITTARD**

**Nijmegen, 1972**



WOORD VAN DANK

Ir. H.J. Woltring is een belangrijke steun geweest bij de totstandkoming van dit proefschrift. Hij heeft zorg gedragen voor de experimentele opstelling en voor het verwerken van de experimentele data. Ik ben hem veel dank verschuldigd.

De Heer W.H.M. Versteegen dank ik voor zijn hulp bij het analyseren van de experimentele data en de modelgegevens.

De Heer W. Klink en de Heer H.P.F.M. Sipman dank ik voor de wijze waarop ze de illustraties hebben uitgevoerd.

# I N H O U D

INLEIDING . . . . .	blz. 9
<u>HOOFDSTUK I</u> . . . . .	blz. 11
INLEIDING . . . . .	blz. 11
1.1. Ontwikkelingen in de technologie	blz. 11
1.2. Gevolgen voor de psychologie . .	blz. 13
1.3. Samenvatting en conclusie . . .	blz. 19
<u>HOOFDSTUK II</u> . . . . .	blz. 20
OPZET VAN DE SYSTEEMLEER . . . . .	blz. 20
2.1. Inleiding . . . . .	blz. 20
2.2. Het begrip systeem . . . . .	blz. 20
2.3. Een formele notatie voor systeem, omgeving en structuur . . . . .	blz. 23
2.4. Systeemhiërarchie . . . . .	blz. 25
2.5. Systeemmodellen . . . . .	blz. 27
2.5.1. Inleiding . . . . .	blz. 27
2.5.2. De modelcyclus . . . . .	blz. 27
2.5.3. Het kwalitatieve model . . . . .	blz. 30
2.5.4. Kwantitatieve modellen . . . . .	blz. 31
2.6. Systeemvariabelen . . . . .	blz. 32
2.6.1. De inputvariabele . . . . .	blz. 32
2.6.2. De beslissingsvariabele . . . . .	blz. 32
2.6.3. De outputvariabele . . . . .	blz. 33
2.6.4. De toestandvariabele . . . . .	blz. 33
2.6.5. De hulpvariabele . . . . .	blz. 37
2.7. Samenvatting . . . . .	blz. 38

## HOOFDSTUK III . . . . . blz. 39

### DE AANPAK VAN COMPLEXE SYSTEMEN DOOR MIDDEL VAN HET INFORMATIE-FEEDBACK-CON- TROLE MODEL . . . . . blz. 39

3.1.	Inleiding . . . . .	blz.	39
3.2.	De ontwikkeling van de systeem- dynamica . . . . .	blz.	40
3.3.	Kenmerken van systeem-dynami- sche modellen . . . . .	blz.	45
3.3.1.	Lineair vs nonlineair . . . . .	blz.	45
3.3.2.	Open vs gesloten . . . . .	blz.	46
3.3.3.	Stabiel vs onstabiel . . . . .	blz.	47
3.3.4.	"Steady state" vs "transient" .	blz.	48
3.3.5.	Analytische vs numerieke oplos- sing . . . . .	blz.	48
3.4.	Eisen voor het formuleren van dynamische systeemmodellen . .	blz.	50
3.5.	De beoordeling van de validi- teit van een model . . . . .	blz.	55
3.6.	Samenvatting . . . . .	blz.	63

## HOOFDSTUK IV . . . . . blz. 64

### AUTOMATISERING EN DE TAAK VAN DE OPERA- TOR IN DE PROCESINDUSTRIE . . . . . blz. 64

4.1.	Automatisering . . . . .	blz.	64
4.2.	Enkele kenmerken van automati- sering . . . . .	blz.	69
4.3.	Ontwikkelingsgraden in de auto- matisering . . . . .	blz.	74
4.4.	Het mens-automaat systeem . . .	blz.	79
4.5.	Mathematische modellen van de operator . . . . .	blz.	91
4.6.	Tekortkomingen van het lineaire feedback model . . . . .	blz.	100
4.7.	Konsekwenties voor de beschrij- ving van de taak van de opera- tor in de procesindustrie . . .	blz.	108

## HOOFDSTUK V . . . . . blz. 112

### EEN SIMULATIEMODEL VAN EEN MENS-MACHINE SYSTEEM . . . . . blz. 112

- 5.1. Inleiding . . . . . blz. 112
- 5.2. De keuze van het te besturen  
proces . . . . . blz. 114
- 5.3. De keuze van het display, de  
control en de inputs . . . . . blz. 118
- 5.4. Vergelijkingen voor het proces,  
de input(s) en het interface . blz. 120
- 5.5. De operator . . . . . blz. 125
- 5.6. Regelmodel van de operator . . blz. 134
- 5.7. De taak-stress . . . . . blz. 145
- 5.8. Lineariteit vs niet-lineariteit blz. 154
- 5.9. Samenvatting . . . . . blz. 163

## HOOFDSTUK VI . . . . . blz. 165

### DE UITVOERING VAN HET EMPIRISCHE ONDER- ZOEK EN EEN ANALYSE VAN DE DATA . . . . blz. 165

- 6.1. Inleiding . . . . . blz. 165
- 6.2. Experimentele opzet . . . . . blz. 165
- 6.3. Het aanpassen van het model aan  
empirische gegevens . . . . . blz. 168
- 6.4. Resultaten . . . . . blz. 174
- 6.5. Analyse . . . . . blz. 178

## HOOFDSTUK VII . . . . . blz. 194

### DE BESCHRIJVING VAN EEN REGELSTRATEGIE blz. 194

- 7.1. Inleiding . . . . . blz. 194
- 7.2. Beschrijving regelstrategie . . blz. 194
- 7.2.1. De beslissingsregel voor een  
toenemende en afnemende error . blz. 195
- 7.3. Beschrijving van het stuurgedrag  
met behulp van de output van  
het simulatiemodel . . . . . blz. 213



7.4.	Een vergelijking van het stuur- gedrag van beide proefpersonen op basis van de simulatiemodel- len . . . . .	blz. 217
7.5.	Het toetsen van het model voor een multiple loop en multiloop stuurtaak . . . . .	blz. 229
7.5.1.	De oogbewegings flip-flop . . .	blz. 232
7.6.	Analyse . . . . .	blz. 241
7.7.	Samenvatting en conclusie . . .	blz. 247
7.8.	Perspectief . . . . .	blz. 252
<u>SAMENVATTING</u> . . . . .		blz. 254
<u>SUMMARY</u> . . . . .		blz. 259
<u>LITERATUUR</u> . . . . .		blz. 263
<u>BIJLAGEN</u> . . . . .		blz. 272
<u>LIJST VAN MODELAFKORTINGEN</u> . . . . .		blz. 304

## INLEIDING

Het ontstaan en de ontwikkeling van de ergonomie hangt nauw samen met de vooruitgang van de technologie. Een fundamenteel probleem voor de ergonomie is het toepassen van psychologische kennis voor het structureren van complexe mens-machine systemen. In Hoofdstuk I worden enkele oorzaken opgesomd voor de moeilijke toepasbaarheid van psychologische kennis. Omdat het verschillend taalgebruik van psychologen en technici een belangrijke rem is voor de bestudering van mens-machine systemen, is het gewenst menselijk gedrag te kunnen beschrijven in termen die compatibel zijn met de terminologie waarin de technische omgeving wordt beschreven. Dit uitgangspunt leidt tot de introductie van het systeemconcept. Mens en machine worden beschouwd als componenten van een groter geheel, dat als een systeem wordt beschouwd.

In Hoofdstuk II wordt nader ingegaan op het systeemconcept, waarbij de modelcyclus centraal staat in de beschouwing.

Omdat voor de beschrijving van het simulatiemodel gekozen is voor de systeem dynamische aanpak (system dynamics approach) zoals deze door J.W. Forrester is ontwikkeld, wordt in Hoofdstuk III een algemene beschouwing gegeven over deze aanpak. Vervolgens wordt in Hoofdstuk IV beschreven welke de problemen zijn bij de beschrijving van de taak van de operator in de procesindustrie. Omdat de operatortaak sterk samenhangt met de ontwikkelingen in de procesbesturing wordt aandacht besteed aan de automatisering. De in dit hoofdstuk gevoerde discussie over observatietechnieken en mathematische modellen leidt tot de motivering voor een simulatiemodel.

In Hoofdstuk V wordt het simulatiemodel ontwikkeld.

In Hoofdstuk VI wordt het model geverifieerd met

behulp van experimentele data.

In Hoofdstuk VII wordt, aan de hand van de structuur van het model, de regelstrategie beschreven van een proefpersoon. Tevens wordt het regelgedrag van beide proefpersonen vergeleken.

Tot slot wordt onderzocht of het ontwikkelde model voor een een-kanaals stuurtaak bruikbaar is voor de bestudering van een twee-kanaals stuurtaak, waarbij de kanalen wel of niet gekoppeld kunnen zijn. Ook wordt onderzocht of informatie over het observatiegedrag van operators de samenhang tussen model en empirie vergroot.

## HOOFDSTUK I

### INLEIDING

#### 1.1 Ontwikkelingen in de technologie

De eerste industriële revolutie wordt gekenmerkt door het omzetten van de ene vorm van energie in een andere vorm. Een bekend voorbeeld hiervan is de stoommachine. Gedurende dit tijdvak worden mens en dier als natuurlijke bronnen van energie steeds meer vervangen door de ontworpen machine.

Karakteristiek voor deze periode is vooral dat enkelvoudige machines ontworpen worden, die als een soort handgereedschap door de mens gebruikt worden voor het uitvoeren van bepaalde taken.

Deze technische vernieuwingen hebben echter grotere gevolgen gehad dan de ontwerpers hebben kunnen voorzien.

Bauer (1966) die zich heeft verdiept in de gevolgen van technische ontwikkelingen zegt hierover:

"As I have indicated, technical changes have proved historically to be particularly explosive sources of second order social, economic and political changes that were never envisioned. This arises largely because at the beginning technical developments tend to be viewed in a rather restricted context.

They are seen as an answer to an agreed problem, and tend to be judged in terms of their adequacy in solving that problem."

Hij vervolgt zijn betoog met:

"True, the phenomenon of the far-ranging consequences of technical change is recognized in principle. But in practice, as a given technical change is considered, it is not customary to anticipate second-order consequences.

An action is often labeled "technical" to offer



reassurance as to its limited implications. The very phrase "purely technical" is used to convey the notion that an action does not have wide-spread ramifications. Because a technical development is both seen and judged as an answer to a rather specific problem, there is, I contend, a strong bias against being concerned over, trying to anticipate, or even thinking about its possible wider consequences."

Gagne (1963) geeft als voorbeeld van dergelijke niet voorziene ontwikkelingen de evolutie van de lamp van gebruiksvoorwerp tot een verlichtingssysteem en later tot een "power distribution system".

Evenzo evolueerde de telefoon tot een communicatiesysteem en de auto tot een transportsysteem. De ontwikkeling van complexe technische apparatuur is vooral versneld door de tweede wereldoorlog. Deze wordt dan ook beschouwd als de voornaamste motor voor de technologie van de tweede industriële revolutie.

Terwijl de eerste industriële revolutie wordt gekenmerkt door energie-omzetting, wordt de tweede gekenmerkt door informatie-verwerking. De militaire technologie stimuleerde de ontwikkeling van zeer snelle automatische rekenmachines. Deze apparatuur moest in staat zijn zeer grote hoeveelheden informatie snel te verwerken, om vervolgens de meest geschikte beslissing te nemen. Deze apparatuur vond bijvoorbeeld toepassing bij luchtdoelafweer.

Een kenmerkende eigenschap van deze apparatuur is, dat hij in staat is zijn output te corrigeren op basis van de verkregen informatie over optredende veranderingen. De momentane toestand wordt vergeleken met een van te voren ingesteld doel en het gedrag wordt aangepast op basis van het waargenomen verschil. De wetenschap die zich hieruit ontwikkeld heeft wordt aangeduid met de naam cybernetica.

De grote complexiteit van de ontwikkelde apparatuur en de grote heterogeniteit van de disciplines die bij de samenstelling ervan betrokken raakten, heeft er toe geleid dat men het vervaardigen van dergelijke apparatuur niet meer kon beschouwen als een som van deelhandelingen. Dit geldt zowel voor ruimtevaartuigen en ballistische projectielen als voor geautomatiseerde processen of geautomatiseerde verkeersregeling.

## 1.2 Gevolgen voor de psychologie

We zullen eerst een korte uiteenzetting geven over de aard van de theoretische psychologie.

Psychologie is de wetenschap die zich bezig houdt met de bestudering van het menselijk gedrag. Het accent ligt op het gedrag van de enkeling en de belangstelling van de psycholoog gaat vooral uit naar het individu.

Onderzoek is vooral toegespitst op wat er zich binnen het individu afspeelt. De omgeving is alleen van belang voor zover ze stimuli genereert en responsies mogelijk maakt. De psycholoog gebruikt constructen om aan te geven welke aspecten een mogelijke rol spelen bij het waargenomen gedrag. Hij praat bijv. over motivatie, aandacht, geheugen, denken, waarnemen en andere functies.

Het zich richten op wat er binnen het individu gebeurt, is voor de afbakening en ontwikkeling van de psychologie als zelfstandige wetenschap, noodzakelijk geweest.

Deze afgrenzing heeft echter tevens geleid tot moeilijkheden bij de toepassing van wetenschappelijke bevindingen van menselijk gedrag, omdat in de toegepaste psychologie de configuratie van de omgeving plotseling wel belangrijk bleek te zijn. Dit heeft tot gevolg gehad dat de toegepaste psychologie, wilde ze enige kans van slagen hebben, ook de omgeving in haar onderzoek moest betrekken. Door de hieruit volgende enigszins andere instelling van haar onder-

zoekers is de toegepaste psychologie een relatief zelfstandig bestaan gaan leiden. Dit geldt vooral voor een toepassingsgebied dat zich aan het begin van deze eeuw heeft ontwikkeld, n.l. de bedrijfspsychologie.

Door het werk van Taylor, die aan het begin van deze eeuw wetenschappelijke principes trachtte toe te passen op de bedrijfsvoering, kwam vooral de arbeidsprestatie in de belangstelling te staan met als verlengstuk het meten van individuele verschillen in prestatie. Het selecteren van hoogwaardig personeel en het aanpassen van de mens aan zijn taak, kreeg zeer veel aandacht.

De selectiecriteria werden voornamelijk vastgesteld op basis van de eigenschappen van de gebruikte apparatuur (Meister, Rabideau, 1965). Met de introductie van de meer complexe apparatuur gedurende de tweede wereldoorlog, zoals bommenwerpers, radar en sonar, die onder moeilijke omstandigheden moesten worden bediend, werden niet alleen veel hogere eisen gesteld aan de bekwaamheid van het bedienend personeel, ook was veel meer personeel nodig.

Omdat de selectie van voldoende bekwaam personeel leidde tot een tekort aan mankracht, werd het noodzakelijk machinekarakteristieken te wijzigen en men diende rekening te gaan houden met de menselijke beperkingen (Meister en Rabideau, 1965).

Dit betekende een belangrijke wijziging in de opvatting van de technici-ontwerpers. Het klinkt nogal vreemd, maar de technische vooruitgang en de toename van de technische complexiteit heeft geleid tot een toenemende belangstelling voor de menselijke factoren. Dit heeft tot gevolg gehad dat kort na de tweede wereldoorlog zich een nieuwe discipline heeft ontwikkeld die vooral tot doel had het werk en de werkomstandigheden aan te passen aan de mens. Deze discipline, die in Europa wordt aangeduid met de naam ergonomie, wordt in de V.S. human (factors) engineering, engineering psychology, psychotechnology

of biotechnology genoemd. In Europa heeft de ergonomie zich voornamelijk ontwikkeld uit de bedrijfsge-neeskunde en de fysiologie. Ze staat het meest in aanzien in Engeland en Zwitserland.

In het begin richtten ergonomen zich voornamelijk op enkelvoudige apparaten die door de operator bediend moesten worden. Men hield zich bezig met het ontwerpen van meters en knoppen, met de werkomgeving, zoals verlichting, lawaai en temperatuur, en met de lay-out van de werkplek.

Door de aard van de werkzaamheden werd ergonomie bedreven door vertegenwoordigers van verschillende disciplines, zoals psychologen, fysiologen, medici en technici. De psychologen-ergonomen gingen zich bekwamen in wat genoemd werd technische psychologie (engineering psychology).

Door het experimentele karakter van de technische psychologie werden de contacten met de experimentele psychologie enigszins hersteld. Hoewel de vraagstellingen verschilden, gebruikten de technische psychologen veelal dezelfde constructen en onderzoek procedures als de experimentele psychologen. Onderzoek dat door technische psychologen werd uitgevoerd kwam neer op het op een of andere manier verwerken van informatie. Signalen werden gekoppeld aan reacties.

Tot ongeveer 1955 werd er weinig aandacht besteed aan de vraag hoe groepen mensen en machines aan elkaar konden worden gekoppeld om gezamenlijk een taak uit te voeren. Deze vraag werd gesteld door de sterke ontwikkeling van het systeemdenken in de technologie. Door een steeds toenemende complexiteit van de apparatuur en de voortschrijdende automatisering, werd men in de technologie gedwongen zich met grote gehelen te gaan bezig houden. Omstreeks die tijd begint echter ook in de ergonomie het systeemconcept ingang te vinden en men begint te spreken van mens-machine systeem. De mens als operator, en de machine, worden beiden beschouwd als componenten van een gro-



ter geheel. De mens wordt in deze opzet als een zeer flexibele, doch minder betrouwbare component beschouwd, die als schakel fungeert tussen mechanische en/of elektronische componenten. Het geheel wordt opgevat als een informatie-verwerkend systeem.

Door de introductie van het systeemconcept, kan men in de ergonomie verder onderscheid gaan maken tussen de reeds genoemde technische psychologie, die het menselijk gedrag bestudeert in interactie met machines, en een psychologie die mens-machine systemen bestudeert en die ook betrokken wordt bij de structurering van deze systemen en dus betrokken wordt in de technologie. Onder technologie verstaan we alle activiteiten die er op gericht zijn een bestaand systeem te verbeteren. Omdat genoemd onderscheid vooral te maken is op basis van het wel of niet gebruiken van het systeemconcept, zullen we de eerste groep blijven aanduiden met de naam technische psychologen en de tweede groep met systeempychologen. De term is afgeleid van een onlangs verschenen boek door deGreene geredigeerd, dat zich voornamelijk met mens-machine systemen bezig houdt en getiteld is: Systems Psychology. (1970) Dit betekent echter niet dat we ons in de term mens-machine systeem beperken tot alleen machines. Systeempychologie heeft betrekking op complexe mens-machine systemen, die bestaan uit meerdere mensen en meerdere machines of processen. Systeempychologisch onderzoek kan betrekking hebben op autorijden, op het bedienen van een chemisch proces of op een ziekenhuisorganisatie. De systeempycholoog onderzoekt het gedrag van mens-machine systemen en hanteert daarbij constructen die gericht zijn op het functioneren van het totale systeem, de mens wordt als een component van dat geheel beschouwd.

Er bestaat een groot verschil tussen technische psychologie en systeempychologie wat betreft de vraagstelling en methode van onderzoek.

De technische psychologie is zeer verwant met de experimentele psychologie en gebruikt dezelfde theoretische constructen als deze, zoals bijv.: stimulus, respons, aandacht, betekenis, vaardigheid, verwachting e.d.

F. Taylor (1963) zegt van de psychologie i.h.a. dat ze concepten heeft ontwikkeld die moeilijk vertaalbaar zijn in het taalgebruik van andere wetenschappen. Dit heeft er voor de technische psychologie toe geleid dat het gedrag van levende wezens in de ene taal en de gedragingen van fysische voorwerpen in de omgeving er van, in een andere taal moesten worden uitgedrukt.

Hij vervolgt met: "it has walled off psychology from the other scientific disciplines and forced psychologists into the position where they could communicate freely only with one another. This has encouraged a kind of conceptual inbreeding which has operated against the development of an altogether vigorous construct language."

Ditzelfde bezwaar geldt ook voor de technische psychologie. Veelal blijken de gehanteerde concepten, die het gedrag van de operator beschrijven, niet vertaalbaar in de concepten die de andere disciplines binnen de ergonomie gebruiken.

Waarin ligt nu het verschil met de systeempychologen?

F. Taylor (1963) vindt dat de taal die door systeempsychologen wordt ontwikkeld, de meest belangrijke bijdrage vormt voor de psychologie en de wetenschap in het algemeen. Door het gebruik van een taal die zowel systeem-relevant als uitdrukbaar is in fysico-mathematische termen, wordt de barriere opgeheven tussen de fysica en de gedragswetenschappen. De systeempycholoog is evenals de technische psycholoog in staat dezelfde concepten te hanteren als de experimentele psycholoog, zoals stimulus, respons, aandacht, betekenis, vaardigheid, verwachting, e.d. Hij is echter tevens in staat de taal te ge-

bruiken van de technicus voor het karakteriseren van het operatorgedrag. In dat geval maakt hij bijv. gebruik van begrippen als: input, output, filter, smoothing, modulatie, stabiliteit, bandbreedte, informatie-transmissie e.d.

Het gebruik van het systeemconcept leidt tot een geheel andere manier van denken. De systeempycholoog vraagt zich af hoe lineair het menselijk gedrag is, of de versterkingsfactor constant blijft of varieert. Voor de systeempycholoog blijft het echter van groot belang ook de taal te blijven spreken van de technische en experimentele psycholoog. Dit is vooral van belang om de doorstroming van inzichten in en kennis over het menselijk gedrag te bevorderen. Als zodanig fungeert hij als intermediair die in staat moet zijn twee wetenschappelijke talen te spreken.

Het basis idee waar de systeempycholoog van uitgaat is, dat zowel levende als niet levende gehele, als systeem beschouwd, eigenschappen gemeen hebben die af te leiden zijn uit de wijze waarop ze gestructureerd of anders uitgedrukt, georganiseerd zijn.

In dit licht bezien is de psychologie slechts een van de disciplines die zich bezig houden met het bestuderen van gedragingen van organismen. Wil men echter komen tot een meer universele taal, die van toepassing is op de gedragingen van levende en niet levende organismen, dan zullen de bestaande grenzen tussen de disciplines, die zich met deelgebieden van dit vraagstuk bezig houden, moeten vervagen en op den duur verdwijnen.

Door de Systeemleer, die uitdrukkelijk is opgezet om de barrières tussen disciplines op te heffen, wordt de ontwikkeling van een dergelijke universele of metataal, mogelijk gemaakt.

### 1.3 Samenvatting en Conclusie

Onder andere door de technologische ontwikkelingen, aangeduid met "eerste industriële revolutie" heeft zich de bedrijfspsychologie ontwikkeld. Door de technologie van de tweede industriële revolutie heeft zich binnen de bedrijfspsychologie een zelfstandige discipline ontwikkeld, genaamd de ergonomie. Deze is een raakvlak van verschillende disciplines als, psychologie, fysiologie en technologie. Door een verandering in het denken van wetenschapsmensen en technici, is het systeemconcept geïntroduceerd. Dit heeft ook invloed gehad op de technische psychologie, als een van de disciplines in de ergonomie. Uit de technische psychologie heeft zich ten gevolge van de introductie van het systeemconcept een benadering ontwikkeld die we hebben aangeduid met systeempsiychologie.

Door het sterk benadrukken van een fysico-mathematische taal als metataal voor mens en machine, die de communicatie tussen psychologen en technici mogelijk maakt, zou men uit het voorgaande kunnen concluderen dat door middel van de systeemleer gepoogd wordt de psychologie te reduceren tot een soort fysica. Dit is echter een misverstand dat voornamelijk berust op het nogal enge gebruik van het begrip "systeem" in de context van het mens-machine systeem. De systeemleer legt als theorie die beperking niet op. Voordat we zullen ingaan op de bezwaren die we hebben tegen de wijze waarop het concept mens-machine systeem in de ergonomie gedefinieerd wordt, en de wetenschappelijke nadelen die dit meebrengt, zullen we eerst een uiteenzetting geven over de opzet van de systeemtheorie.

## HOOFDSTUK II

### OPZET VAN DE SYSTEEMLEER

#### 2.1 Inleiding

Momenteel is de systeemleer een verzamelnaam voor een aantal theorieën die gemeen hebben dat ze zich bezig houden met systemen.

Systeemleer is enerzijds een bepaalde manier van waarnemen, men beschouwt iets als een systeem. Anderzijds is het een manier van denken. Men gaat een bepaalde taal gebruiken om datgene wat men als een systeem beschouwt te kunnen beschrijven.

Met het eerste aspect van de systeemleer stamt overeen de opvatting van Angyal (1969) die zegt dat een systeem "Gestaltqualität" heeft.

Om de taal van de systeemleer te begrijpen zullen we de meest belangrijke begrippen behandelen.

#### 2.2 Het begrip systeem

In de literatuur vindt men veel definities van het begrip systeem.

Von Bertalanffy (1968): "Systems, i.e., complexes of elements standing in interaction."

Ackoff (1969): "We can define a system broadly and crudely as an entity, conceptual or physical, which consists of interdependent parts."

Forrester (1968): "System means a grouping of parts that operate together for a common purpose."

Wilson en Wilson (1965): "The word system is used to convey at least two different ideas:

- 1 a regular or orderly arrangement of components or parts in a connected and interrelated series of whole
- 2 a series or group of components or parts necessary to some operation.

Hall en Fagen (1968) geven een meer abstracte definitie:

"A system is a set of objects together with relationships between the objects and between their attributes."

Op deze laatste definitie zullen we nader ingaan.

Hall en Fagen onderscheiden in een systeem

- elementen (objects)
  - eigenschappen (attributes)
  - relaties (relationships).
- De elementen zijn de delen of componenten van een systeem. Deze kunnen zowel fysisch als abstract zijn. Zo kunnen spieren, genen, neuronen, afdelingen van een organisatie, wiskundige variabelen, vergelijkingen, wetten, allemaal elementen zijn van een systeem.
  - Attributen of eigenschappen van de elementen kunnen b.v. zijn van:
    - spieren - spanning, lengte,
    - afdeling - administratie, directie,
    - neuronen - transmissiesnelheid.
  - De relaties maken het systeem tot een geheel, doordat ze de elementen aan elkaar koppelen.

### Het begrip omgeving

Onder de omgeving van een systeem wordt verstaan alles wat niet tot het systeem behoort maar er wel relaties mee heeft. Men kan ook zeggen dat de omgeving datgene is dat van invloed is op en beïnvloed wordt door het systeem, maar niet door het systeem kan worden gestuurd.

Hall en Fagen geven de volgende definitie:

"For a given system, the environment is the set of all objects a change in whose attributes affect the system and also those objects whose attributes are changed by the behavior of the system,"

Het onderscheid tussen wat tot het systeem behoort en wat tot de omgeving is moeilijk. Het hangt af van de bedoeling van de onderzoeker wat hij tot het systeem rekent en wat niet. Het onderverdelen van het onderzochte universum in systeem en omgeving kan op vele manieren gebeuren en is in feite nogal arbitrair. Met betrekking tot de probleemstelling is de omgeving ongestructureerd, dit in tegenstelling tot het systeem. Het specificeren van de omgeving is echter bij lange geen triviaal probleem. Wil men de omgeving volledig beschrijven dan dient men alle factoren te kennen die het systeem beïnvloeden en door het systeem beïnvloed worden.

Dit is in het algemeen even moeilijk als het volledig beschrijven van het systeem.

In de fysica en chemie lukt het maken van dit onderscheid systeem-omgeving vrij goed door de methode van idealiseren. Zo wordt bijvoorbeeld gewerkt met veren zonder massa, geen wrijving ten gevolge van luchtweerstand, ideale gassen e.a. In de biologie, psychologie, sociologie en economie is het heel wat moeilijker systeem en omgeving te onderscheiden. In de experimentele psychologie komt het probleem van de omgeving ter sprake wanneer gekeken wordt naar alle relevante variabelen die verder tijdens de uitvoering van het experiment onder controle moeten worden gehouden.

### Het structuurbegrip

In 't Veld (1970) geeft als definitie voor de structuur van een systeem: de onderlinge rangschikking

van zijn elementen op een gegeven tijdstip.

### 2.3 Een formele notatie voor systeem, omgeving en structuur

De Leeuw (1970) heeft op een elegante manier datgene wat we tot nu toe in woorden hebben gesteld, omgezet in een formele notatie. Hij begint met het introduceren van een objectenverzameling  $W$  die bestaat uit de objecten of elementen  $w_1 \dots w_n$ .

$$W = \{w_1 \dots w_n\} \quad (2.1)$$

Wij zullen een attributenverzameling  $A_{w_i}$  definiëren, dit is de verzameling attributen toegekend aan het element  $w_i$ .

$$A_{w_i} = \{a_{1i} \dots a_{ni}\} \quad (2.2)$$

Vervolgens definiëren we een attributenverzameling  $A$ , die de verzameling is van alle attributen van de objectenverzameling  $W$ .

$$A = \{A_{w_1} \dots A_{w_m}\} \quad (2.3)$$

Er bestaat een relatie tussen twee attributen  $a_1$  en  $a_2$ , als een verandering in het element  $a_1$  een verandering in het element  $a_2$  tot gevolg heeft en omgekeerd, wanneer een verandering in het element  $a_2$  een verandering in  $a_1$  tot gevolg heeft. In formele notatie:

$$R\{a_1; a_2\} \iff R\{a_1 \rightarrow a_2\} \vee R\{a_1 \leftarrow a_2\} \vee R\{a_1 \leftrightarrow a_2\} \quad (2.4)$$

Omdat we zullen aannemen dat attributen slechts kunnen worden toegekend aan objecten, zullen we in



tegenstelling tot de Leeuw (op. cit.) niet uitgaan van een objectenverzameling maar van een attributenverzameling  $A$  voor het definiëren van een systeem. Wanneer  $A$  een attributenverzameling is dan:

$$\forall B (B \subset A \wedge B \neq A \wedge B \neq \emptyset \Rightarrow R\{B; A \setminus B\})^* \quad (2.5)$$

$\Leftrightarrow A$  is een systeem

De omgeving  $E$  (=Environment) van een systeem  $S$  met attributenverzameling  $A$  kan als volgt worden gedefinieerd:

$$E_S = \{a \mid a \notin A \wedge R\{a; A\}\} \quad (2.6)$$

In woorden:

De omgeving van  $S$  is de verzameling  $E_S$  bestaande uit alle attributen die niet tot  $A$  behoren en wel relaties vertonen met  $A$ .

Uit de voorgaande notatie voor de omgeving volgt dat, wanneer  $E_S$  een lege verzameling is ( $E_S = \emptyset$ ),  $S$  een gesloten systeem is.

$$E_S = \emptyset \quad \Leftrightarrow S \text{ is gesloten en evenzo}$$

$$E_S \neq \emptyset \quad \Leftrightarrow S \text{ is open.}$$

Uitgaande van de notatie van de Leeuw (op. cit.) maar gebruik makend van de attributenverzameling  $A$  kunnen we de interne structuur als volgt definiëren. De interne structuur van een systeem  $S$  met attributenverzameling  $A$  is een verzameling  $R_{AS}$ :

$$R_{AS} = \{R\{B; A \setminus B\} \mid B \subset A \wedge B \neq \emptyset \wedge B \neq A\} \quad (2.7)$$

De externe structuur van een systeem  $S$  met een attributenverzameling  $A$  en omgeving  $E$  is de verzameling  $R_{ES}$ :

$$R_{ES} = \{R\{B;A\} \mid B \subset E\} \quad (2.8)$$

De structuur van een systeem  $S$  met omgeving  $E$  en attributenverzameling  $A$  is  $R_S$ .  $R_S$  is de vereniging van  $R_{AS}$  en  $R_{ES}$

$$R_S = R_{AS} \cup R_{ES} \quad (2.9)$$

De Leeuw (op. cit.) karakteriseert een systeem formeel als een vierling:

$$S = \langle A, E, R_{AS}, R_{ES} \rangle \quad (2.10)$$

Is het systeem gesloten dan heeft het geen omgeving en bestaat er geen externe structuur, d.w.z.

$$S = \langle A, \emptyset, R_{AS}, \emptyset \rangle \text{ of } S = \langle A, R_{AS} \rangle \quad (2.11)$$

## 2.4 Systeemhiërarchie

Uit de beschouwing van een systeem en zijn omgeving kan worden afgeleid dat een systeem kan worden onderverdeeld in subsystemen. Dit houdt in dat elementen die tot een bepaald subsysteem behoren, beschouwd kunnen worden als elementen uit de omgeving van een ander subsysteem.

Het gedrag van een subsysteem hoeft niet overeen te stemmen met het gedrag van het originele systeem. Het is mogelijk systemen onder te verdelen in subsystemen en elementen, waarbij men de elementen weer kan beschouwen als systemen van lagere orde. De Leeuw maakt nog een derde partitie mogelijk, hij onderscheidt ook nog partiële systemen. In een systeem zijn dus te onderscheiden subsystemen, partiële systemen en elementen. Van deze elementen is of de structuur niet bekend, of de onderzoeker heeft er

geen belangstelling voor. Wanneer men in dat geval naar de kenmerken van de elementen gaat kijken, spreekt men in de literatuur van "black boxes", een begrip dat in de psychologie niet onbekend is.

### Subsysteem

De Leeuw geeft als belangrijkste kenmerk van een subsysteem dat het een deelverzameling is van het oorspronkelijke, waarbij alle oorspronkelijke relaties tussen de elementen onveranderd behouden blijven. Een deelverzameling is een min of meer zelfstandig onderdeel van een systeem. Het psychologisch laboratorium kan men beschouwen als een subsysteem van de universiteit als systeem.

### Partieel systeem

Is een subsysteem een deelverzameling van elementen van een systeem, een partieel systeem kan betrekking hebben of op een subset van uitgangsvariabelen of op een subset van relaties of op een combinatie van beide. De Leeuw (op. cit.) spreekt in deze context ook wel van een aspect-systeem. Zo kan men de onderwijsorganisatie beschouwen als een partieel systeem van het systeem, universiteit.

### Black box

Bij de beschouwing van een systeem als een black box kent de onderzoeker de interne structuur van het systeem niet of is hij er nog niet in geïnteresseerd. In de psychologie heeft het begrip black box vooral bekendheid gekregen als gevolg van de opkomst van het behaviorisme. Gezocht wordt naar stimulus-respons relaties en de onderzoeker is niet geïnteresseerd in de interne structuur van de mens, die als een black box wordt beschouwd.

## 2.5 Systeemmodellen

### 2.5.1 Inleiding

Modellen zijn zeer algemeen geaccepteerd als een middel voor het bestuderen van complexe fenomenen. De waarde van een model blijkt vooral daaruit dat het de onderzoeker in staat stelt concrete fenomenen beter te begrijpen dan het geval is bij het observeren van het werkelijk fenomeen.

Omdat een model een idealisering van de werkelijkheid is, nemen we steeds aan dat het model een transformatie is van de werkelijkheid en we gaan uit van de vooronderstelling dat de werkelijkheid invariant is.

Leuba (1964) stelt dat wanneer iemand de werkelijkheid afbeeldt in een model, hij tracht te ontdekken welke orde, of organisatie, in het model vervat moet liggen, wil men in staat zijn de gegeven gebeurtenissen te verklaren.

Nadat een model met succes is afgeleid van de werkelijke situatie, keert men de gang van zaken om en wordt de werkelijke situatie afgeleid uit het model. Dit proces staat bekend onder de naam "modelcyclus". De keuze van een model wordt niet slechts bepaald door de kenmerken van de te besturen werkelijkheid, ze wordt ook beïnvloed door de voorkeur van de onderzoeker. Leuba (1964) concludeert:

"The problem in selecting a model is to select one whose errors can be tolerated, not in selecting one without errors."

### 2.5.2 De modelcyclus

Zoals we reeds gesteld hebben is een model een abstractie van de werkelijkheid. Wordt nu uitgegaan van een werkelijk bestaand of concreet systeem, dan ziet men vaak ter onderscheid van het systeemmodel dat hieruit ontwikkeld wordt, het werkelijk systeem aangeduid met de naam "Real Life system".

Volgens Hanken (1970) bestaat het uitgangspunt van de systeemleer uit het universum  $U$ , en de probleemstelling  $P$  ( $\langle U, P \rangle$ ), waarbij zowel systeem als omgeving tot het universum worden gerekend en het systeem veelal wordt bestudeerd vanuit een probleemstelling.

Zo kan men bijvoorbeeld een universiteit als een systeem beschouwen en dit systeem bestuderen met betrekking tot de doorstroming van studenten. Het universum en de probleemstelling zijn dan bepalend voor het model dat men ontwikkelt.

We hebben reeds aangegeven wat onder de modelcyclus wordt verstaan, en we zullen er nader op ingaan wat betreft een bepaald modeltype, n.l. de symbolische modellen, omdat deze voor ons onderzoek van belang zijn. Bij het gebruik maken van symbolische modellen worden de eigenschappen van het systeem voorgesteld door wiskundige, logische of semantische symbolen. Hanken maakt een onderscheid tussen abstracte en empirische modellen. Abstracte modellen zijn meestal wiskundig of logisch van aard. De samenhang met de ervaringswereld ontbreekt of is zeer verwijderd. Een abstract model is deductief van aard.

Empirische modellen vertonen veel meer overeenkomst met de ervaringswereld. Dit komt vooral tot uiting in de symbolen die veel nauwer samenhangen met datgene wat men kan waarnemen. In de paragrafen 2.2 en 2.3 hebben we naast verbale definities gebruik gemaakt van een formele. De formele definitie van een systeem met gebruik van de primitieve termen, attribuut en relatie, geeft in feite een symbolisch model weer.

Hanken onderkent in de modelcyclus drie fasen: de abstractie, de deductie en de realisatie. Grafisch wordt dit als volgt voorgesteld (zie Fig. 2.1).

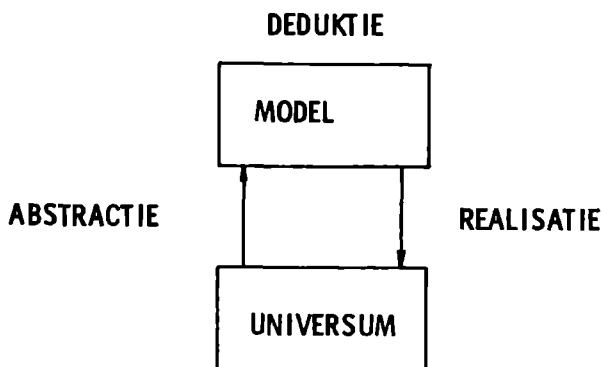


FIG. 2.1 MODELCYCLUS

Hij verstaat onder abstractie: "Het kiezen van een model uitgaande van een gegeven universum en probleemstelling."

Het deductieproces wordt gekenmerkt door het "manipuleren van het model om een oplossing van het gegeven probleem te verkrijgen" en de realisatie bestaat uit het toepassen van de oplossing op het gegeven systeem.

Hanken noemt deze reeks van operaties de modelcyclus of empirische cyclus.

Naar de mate van abstractie onderscheidt hij drie soorten systeemmodellen:

- 1. Het empirische model, dat veel overeenkomst vertoont met een bepaald probleemgebied, zoals bijvoorbeeld het bedrijf, de school, het individu e.a. In het empirische model vindt men enkel datgene terug van het probleemgebied dat de onderzoeker van belang acht.
- 2. Het abstracte model. Deze modellen zijn veel nauwer verbonden met de wiskunde en de lo-

gica. Het abstracte model vertoont meer samenhang met het metamodel. Door het abstracte model te relateren aan het metamodel, kan men komen tot een klassificatie van abstracte modellen. Deze klassificatie is vooral van belang wanneer men een specifiek abstract model zoekt waarmee men bepaalde ervaringsfeiten kan verklaren.

- 3. Het meta-model. Volgens Hanken (op. cit.) wordt het karakter van de systeemleer in hoge mate bepaald door de keuze van het metamodel. Voor het toepassen van de systeemleer, met name in de gedrags- en sociale wetenschappen, waar theorie en praktijk een gescheiden bestaan leiden, is het echter zeer belangrijk dat het metamodel niet dermate algemeen is dat de samenhang met de empirie verloren gaat en de uitspraken zo algemeen worden dat ze de kans lopen triviaal worden.

Grafisch ziet de modelcyclus er dan als volgt uit.  
(Hanken, op. cit.)  
(Zie Fig. 2.2).

Aan de hand van deze modelcyclus geeft Hanken (op. cit.) aan wat de betekenis is van de systeemleer. Door de opbouw van systeemmodellen naar de mate van abstractie kan een gegeven probleemveld binnen een meer algemeen raamwerk worden beschouwd.

"In dit proces van abstractie zal een bepaald begrippenarsenaal worden opgebouwd dat een interdisciplinair karakter draagt en met het meta-model kenmerkend is voor de systeemleer".

### 2.5.3 Het kwalitatieve model

Zoals we nog zullen zien speelt het kwalitatieve model een belangrijke rol bij het bestuderen van complexe systemen. Het is de eerste abstractie-

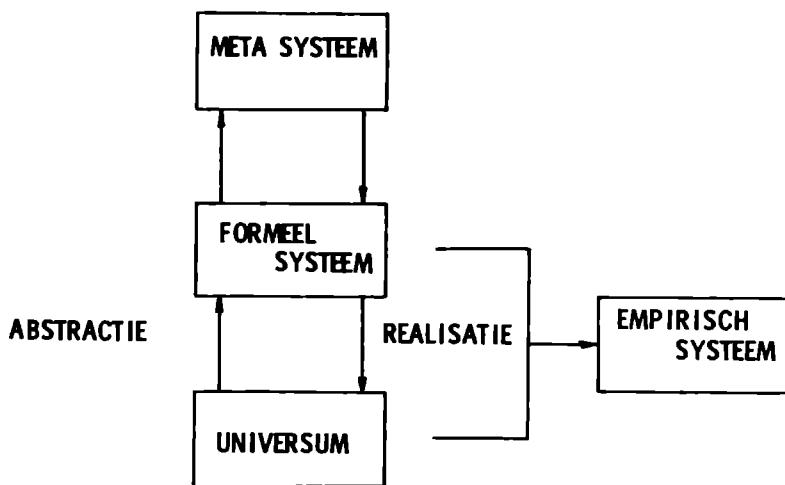


FIG. 2.2 MODEL CYCLUS VAN SYSTEEMMODEL

fase in de modelcyclus. In het kwalitatieve model wordt vastgesteld welke objecten tot het systeem worden gerekend en welke tot de omgeving. Ook wordt aangegeven welke attributen aan de objecten worden toegekend en welke relaties van belang zijn tussen de attributen.

Een kwalitatief model werkt met begrippen of attributen; deze worden gemeten op nominale of ordinale schaal.

#### 2.5.4 Kwantitatieve modellen

Een kwantitatief model werkt met variabelen (Hanken, op. cit.), d.w.z. de attributen worden gemeten op metrische schaal.

Omdat we ons zullen verdiepen in dynamische systemen, zijn de variabelen tijdsafhankelijk. Op basis van deze beschouwing kan men de variabelen als volgt



indelen (Forrester, 1961, Hanken, op. cit.):

1. Inputvariabelen
2. regel- of beslissingsvariabelen
3. outputvariabelen
4. toestandvariabelen
5. hulpvariabelen.

In een descriptief model zijn 1 en 2 onafhankelijke variabelen, 4 en 5 kunnen zowel onafhankelijke als afhankelijke variabelen zijn, 3 is de afhankelijke variabele. Alleen de toestandvariabele heeft een tijdvertraging.

Omdat deze systeemmodel variabelen in de komende hoofdstukken een centrale rol zullen spelen, zullen we ze meer uitvoerig behandelen. Deze vijf variabelen vormen samen een meta-model in de systeemleer.

## 2.6 Systeemvariabelen

### 2.6.1 De inputvariabele

Het belangrijkste kenmerk van de inputvariabele is dat hij zich aan de controle van het systeem onttrekt, hij is niet manipuleerbaar. Formeel beschouwd is de inputvariabele een onafhankelijke variabele.

### 2.6.2 De beslissingsvariabele

Het nemen van beslissingen betekent feitelijk, het omzetten van informatie in handelingen (Forrester, 1961). De beslissingsregel is een formele uitspraak die de relatie aangeeft tussen bronnen van informatie en de resulterende stroom van beslissingen. In de economische literatuur wordt deze beslissingsregel ook wel beleid genoemd. In termen van het kwantitatieve model is de beslissingsvariabele een onafhankelijke variabele die wel manipuleerbaar is. Bijvoorbeeld: de manager kan op basis van een al dan niet geformuleerd beleid be-

slissingen nemen, gebruik makend van de hem ter beschikking staande informatie. Bij de servomechanismen is het de overdrachtsfunctie die fungeert als beslissingsregel. Deze overdrachtsfunctie geeft weer, hoe de output van een 'black box' afhangt van de input.

### 2.6.3 De outputvariabele

De outputvariabele kan worden beschouwd als de variabele die het systeemgedrag weergeeft waarin men geïnteresseerd is. Als zodanig kan hij ook gezien worden als de doelvariabele omdat de feitelijke output geëvalueerd kan worden in termen van de gewenste of verwachte output. De outputvariabele is een afhankelijke variabele.

### 2.6.4 De toestandvariabele

Omdat de functie van de toestandvariabele een belangrijke rol speelt in het door ons gekozen abstracte model, zullen we er uitvoerig op ingaan.

Minsky (1967) gaat bij de toestandbeschrijving uit van een black box, een inputkanaal ( $S$ ) en een outputkanaal ( $R$ ). Op elk tijdstip  $t$  genereert de omgeving een input  $S(t)$  als stimulus, en op elk moment selecteert de black box een output  $R(t)$ .

Willen we nu de black box compleet beschrijven dan zullen we moeten aangeven hoe de output afhangt van de input. In het algemeen kunnen we stellen dat de output ( $R$ ) afhangt van het gehele verleden van de black box. Er geldt evenwel een belangrijke restrictie: de output op tijdstip  $t$  hangt niet af van de input op tijdstip  $t$  (Minsky, 1967, Forrester, 1961). Signalen kunnen dus niet instantaan door de black box worden gestuurd en verblijven gedurende een zekere tijdsinterval in de black box.

De output op tijdstip  $t + 1$  is de eerst mogelijke die kan afhangen van de input op tijdstip  $t$ .

Wanneer een black box enige tijd functioneert in interactie met zijn omgeving, heeft ze steeds signalen uit de omgeving ontvangen waarop ze heeft gereageerd.

Om de momentane responsie van een black box te kunnen vaststellen, introduceert Minsky het concept "verleden" ( $V(t)$ ).  $V(t)$  is het verleden van het boven beschreven proces tot het tijdstip  $t$ . Dit betekent dat  $V(t)$  alle toestanden van de black box weergeeft vanaf het inwerking treden tot op het tijdstip  $t$ . Tevens wordt verondersteld dat  $V(t)$  alle stimuli insluit die vanaf het tijdstip  $t$  de black box zijn binnengekomen.

Koppelen we nu de black box op het tijdstip  $t$  los van zijn omgeving en voegen we een signaal  $S_i$  toe, dan zal ze op het tijdstip  $t + 1$  reageren met een signaal  $R_j$ . Dit signaal  $R_j$  is niet slechts afhankelijk van de input  $S_i$  maar ook van de toestand binnen de black box. Wanneer we vervolgens aannemen dat de toestand in de black box bepaald wordt door het verleden  $V(t)$  dan moet er volgens Minsky een relatie bestaan van de volgende vorm.

$$R(t + 1) = F(V(t), S(t)) \quad (2.12)$$

Het signaal  $S(t)$  heeft betrekking op regelbare en niet regelbare ingangsvariabelen. Een dergelijke relatie is moeilijk hanteerbaar omdat ze geheel afhangt van het verleden van de black box.

Het is mogelijk zich voor te stellen dat elke black box op een gegeven tijdstip  $t$  een oneindig aantal geschiedenissen kan hebben doorlopen. Het feitelijk verleden echter zal de responsie van de black box bepalen op een gegeven stimulus.

Men kan zich voorstellen dat gebeurtenissen uit het verre verleden een bijdrage leveren voor het bepalen van een bepaalde responsie. In dat geval kan men zeggen dat de black box een spoor of een geheugen vertoont van die gebeurtenissen. Wanneer nu elke gebeurtenis een onafhankelijk spoor nalaat, moet de black box een oneindige capaciteit hebben om ze op te slaan. De black box en systemen waarin wij geïnteresseerd zijn, hebben slechts een eindige capaciteit.

Dit betekent dat een dergelijke black box slechts onderscheid kan maken tussen een eindig aantal voorgeschiedenissen. Minsky introduceert daarom het begrip equivalent verleden.

Stel bijvoorbeeld dat we twee identieke black boxen hebben. De ene heeft op het tijdstip  $t$  een verleden  $V_1(t)$  en de andere  $V_2(t)$ .

De twee black boxen hebben een equivalent verleden wanneer de voor elke mogelijke opeenvolgende reeks signalen  $S(t)$ ,  $S(t+1)$ ,  $S(t+2)$ , dezelfde outputreeks leveren. Op basis van een reeks inputsignalen en de daaropvolgende outputsignalen, is het niet mogelijk dergelijke black boxen van elkaar te onderscheiden.

Omdat we enkel geïnteresseerd zijn in systemen met een eindige capaciteit, en een black box is een bijzonder geval van een systeem, zullen we stellen dat het slechts mogelijk is een onderscheid te maken tussen een een eindig aantal verschillende equivalente voorgeschiedenissen. Deze kunnen worden ingedeeld in een aantal klassen. Een bepaald verleden hoort tot een bepaalde klasse en is er volledig identiek mee, terwijl ze volledig gescheiden is van alle andere. Deze eigenschap is een gevolg van de definitie van equivalent verleden.

De klassen waarin de equivalente voorgeschiedenissen kunnen worden ingedeeld, worden ook de interne toestanden van het betreffende systeem genoemd.

De interne toestand van het systeem zullen we aanduiden met  $Q(t)$  en ze is een verzameling die bestaat uit de elementen  $q_1(t), q_2(t) \dots q_n(t)$ .

Het zal uit deze beschouwing duidelijk zijn dat alleen gesproken is over dàt geheugen van het systeem dat een rol speelt bij het genereren van outputs op inputsignalen. Omdat niet gesproken wordt van inputsignalen die geen outputsignalen opleveren, valt het stuk geheugen dat op de boven beschreven wijze niet wordt uitgedrukt, buiten de beschouwing. Volgens Minsky is het misschien daarom beter te spreken van externe toestanden, wanneer we de voorgeschiedenissen van een systeem in klassen onderverdelen.

De relatie

$$R(t+1) = F(V(t), S(t)) \quad (2.13)$$

kan nu als volgt worden geschreven:

$$R(t+1) = F(Q(t), S(t)) \quad (2.14)$$

De interne toestand  $Q(t)$  hangt af van het gehele verleden van het systeem.

Het is mogelijk de afhankelijke variabele  $R(t)$  te relateren aan het onmiddellijke en het verre verleden. De geschiedenis van het systeem op het tijdstip  $t$  is een aaneenschakeling van alle gebeurtenissen die ooit van invloed zijn geweest. Het verschil tussen het verleden op tijdstip  $t$  en  $t + 1$  ligt slechts in de extra term, namelijk het signaal  $S(t)$ .

Wat is de interne toestand op het tijdstip  $t + 1$  ? De toestand  $Q(t+1)$  van het systeem kan slechts afhangen van de voorafgaande toestand  $Q(t)$  en de stimulus  $S(t)$ .

$$Q(t+1) = G(Q(t), S(t)) \quad (2.15)$$

De functies  $F$  en  $G$  geven een zo compleet mogelijke beschrijving van het systeem, echter alleen voor het geval we niet geïnteresseerd zijn in wat er binnenin gebeurt.

Het systeem is aldus te beschrijven:

$$Q(t+1) = G(Q(t), S(t)) \quad \text{en}$$

$$R(t+1) = F(Q(t), S(t))$$

Een eenvoudig systeem is zo te beschrijven, maar in het algemeen zijn er meerdere ingangs- en uitgangssignalen en toestandvariabelen. In dat geval stellen  $S(t)$ ,  $R(t)$  en  $Q(t)$  vectoren voor.

Wanneer het systeem bestaat uit twee dobbelstenen (de elementen), en elk element 6 toestanden kan aannemen, kan het systeem zich maximaal in 36 verschillende toestanden bevinden.

In een elektrisch netwerk vormen de stroomsterkte en de spanning de toestandvariabelen. In een onderwijsstelsel zou men als toestandvariabelen, het aantal leerlingen, de gemiddelde studieduur en de satisfactie bij docenten en studenten, kunnen beschouwen, afhankelijk van de doelstelling.

### 2.6.5 De hulpvariabele

Een hulpvariabele wordt voornamelijk gebruikt om complexe functies op te splitsen in meer eenvoudige. De hulpvergelijking is van groot nut voor het in overeenstemming houden van model en het beschouwde systeem, omdat ze gebruikt kan worden om afzonderlijk de vele factoren te bepalen die van belang zijn voor het vaststellen van de decisieregel (Forrester, 1961). Een variabele wordt in het systeemmodel een hulpvariabele door de rol die hij speelt. Hij kan zowel een afhankelijke als onafhankelijke variabele zijn.

## 2.7 Samenvatting

In dit hoofdstuk hebben we een overzicht gegeven van de voornaamste systeembegrippen. Aandacht werd besteed aan de modelcyclus en aan de systeemvariabelen voor het ontwikkelen van kwantitatieve modellen. Deze variabelen vormen de bouwstenen waaruit systeemmodellen worden samengesteld. Het algemene model dat uit input-, beslissings-, toestand-, hulp- en outputvariabelen bestaat, wordt opgevat als een meta-model. In het volgende hoofdstuk zullen we nader ingaan op een bepaald abstract model, het informatie-feedback-controle model, zoals het in zijn specifieke kenmerken door Forrester (1961) is ontwikkeld.

## HOOFDSTUK III

### DE AANPAK VAN COMPLEXE SYSTEMEN DOOR MIDDEL VAN HET INFORMATIE-FEEDBACK-CONTROLE MODEL

#### 3.1 Inleiding

Voor de bestudering van een sociale werkelijkheid die complex van aard is, biedt de systeemleer in aanzet veel mogelijkheden. Het is echter wel van groot belang duidelijk te definiëren wat men als systeem beschouwt. Een samenleving, een regering, de industrie of een stad zijn niet noodzakelijk systemen. Het zijn steeds aspecten van dergelijke verschijnselen die men als systeem kan beschouwen. Zo kunnen bijvoorbeeld gezondheidszorg, opleiding en energievoorziening, beschouwd worden als systemen die betrekking hebben op een samenleving. In een stad kan men het openbaar vervoer als een systeem beschouwen. Wanneer men echter spreekt over een samenleving als systeem, zonder dat men omschrijft wat men in dat verband onder dat begrip verstaat, is de kans groot dat men terecht komt in een veelal ideologische spraakverwarring.

In dit hoofdstuk zullen we het begrip sociaal systeem in algemene zin gebruiken. We zullen er onder verstaan een werkelijkheid die we als systeem beschouwen, en die vanuit sociaal-wetenschappelijk oogpunt bezien, relevant is.

Zo kunnen we in de industrie, in het onderwijs of in een ziekenhuisorganisatie verschijnselen tegenkomen die sociaal-wetenschappelijk relevant zijn en die we door middel van de systeemleer kunnen onderzoeken. Bij sociale systemen zijn steeds mensen betrokken die, in onderlinge samenwerking, al of niet gebruik makend van apparatuur, bezig zijn een gesteld doel te verwezenlijken. Dit betekent dat



zo'n systeem een of meerdere inputs en outputs kent. De inputs worden verwerkt en bewerkt in een proces, dat functioneert als gevolg van menselijke activiteiten. In deze zienswijze worden de mensen beschouwd als deel uit makend van dat proces.

Forrester, (1961, 1968, 1969, 1971) heeft zich ongeveer vijftien jaar bezig gehouden met de bestudering van sociale systemen. Hij heeft daartoe een methodiek ontwikkeld die gebaseerd is op de feedbacktheorie, maar hij heeft deze aangepast aan de typische kenmerken van sociale systemen. Voor de sociaal-wetenschappelijke onderzoeker is de aanpak zeer relevant omdat ze hem de mogelijkheid biedt veel voorhanden zijnde kennis te integreren tot een groter geheel, in de vorm van een aantal complexe feedback modellen, die meer inzicht opleveren dan de kennis van afzonderlijke deelgebieden. Formeel beschouwd valt de aanpak van Forrester, die bekendheid heeft gekregen onder de naam "Industrial Dynamics" geheel binnen de systeemleer.

Het veld van onderzoek was aanvankelijk op bedrijven gericht, vandaar de naam "Industrial Dynamics". De laatste jaren wordt de methode veel meer gebruikt ter bestudering van verschijnselen in de samenleving in het algemeen (Urban Dynamics, 1969, World Dynamics, 1971). Dit is aanleiding geweest deze aanpak systeemodynamica (System Dynamics) te noemen.

### 3.2 De ontwikkeling van de systeemodynamica

Op het Massachusetts Institute of Technology (M.I.T.) heeft men zich de laatste 40 jaren o.a. bezig gehouden met het ontwikkelen van methoden voor het inzichtelijk maken van de dynamische kenmerken van complexe systemen. Het werk is begonnen in 1930, toen V. Busch een differentiaal analysator bouwde voor het oplossen van vergelijkingen van enkele eenvoudige technische problemen.

Gedurende die periode ontwikkelde N. Wiener zijn concepten van feedbacksystemen, wat later bekend werd onder de naam cybernetica.

H. Hazen schreef een van de eerste inleidende stukken op het gebied van feedback controle. In de veertiger jaren stichtte G.S. Brown het laboratorium voor servomechanismen waar de theorie van de feedbacksystemen verder werk uitgewerkt.

Forrester hield zich in de beginjaren vijftig, als hoofd van het "Digital Computer Laboratory" bezig met het ontwikkelen van computers, die tevens dienden als simulatoren voor systemen. Sinds 1956 hebben hij en zijn medewerkers van de "Alfred Sloan School of Management" van M.I.T. deze ontwikkelingen uitgebreid om de grotere complexiteit van sociale systemen aan te kunnen (Forrester, 1971).

Omdat tot voor kort de activiteiten van Forrester en zijn medewerkers werd aangeduid met "Industrial Dynamics", vindt men vaak deze naam in de literatuur terug. Meer recente literatuur refereert wat betreft de aanpak naar de naam "System Dynamics".

Wat houdt deze aanpak in en welke opvattingen hebben tot de ontwikkeling ervan bijgedragen?

Forrester (1961) geeft als algemene definitie:

"Industrial Dynamics is the study of the information-feedback characteristics of industrial activity to show how organizational structure, amplification (in policies) and time delays (in decisions and actions) interact to influence the success of the enterprise. It treats the interaction between flows of information, money, orders, materials, personnel, and capital equipment in a company, an industry, or a national economy."

In een latere publicatie (1969) zegt hij:

"From the standpoint of Industrial Dynamics, systems are seen as feedbackprocesses having a specific and orderly structure. From the structure of the particular system arises its dynamic

behavior. The industrial-dynamics approach to a social system organizes the growth and goal-seeking processes of the system into a computer model."

In zijn meest recente publicatie (1971) zegt Forrester:

"Our knowledge and assumptions about the component of a system, even systems as complex as our social systems, can now be interrelated and examined through methods that have been developed in the last several decades. Such is done by organizing the individual concepts into a "model" that reveals the consequences and internal inconsistencies of our assumptions and fragments of knowledge."

Centraal in deze uitspraken staan begrippen als informatieterugkoppeling, structuur, het opbouwen van een model door het organiseren van enkelvoudige concepten.

Wat zijn de voordelen van een dynamisch model van een sociaal systeem?

Forrester (1968) geeft enkele voordelen van het ontwikkelen van dynamische modellen van complexe systemen. Hij zegt:

"The human mind is well adapted to building and using models that relate objects in space. Also, the mind is excellent at manipulating models that associate words and ideas. But the unaided mind, when confronted with modern social and technological systems, is not adequate for constructing and interpreting dynamic models that represent changes through time in complex systems."

De mens is zeer wel in staat een structuur van sociale systemen te onderkennen waarin de beschikbare kennis en informatie kan worden ingepast.

"But when the pieces of the system have been assembled, the mind is nearly useless for anticipating the dynamic behavior that the

system implies." (Forrester, 1971).

Als resultaat van zijn ervaring met het ontwikkelen van dynamische modellen van sociale systemen, komt Forrester (1969) tot de volgende conclusie:

"It has become clear that complex systems are counterintuitive. That is, they give indications that suggest corrective action which will often be ineffective or even adverse in its results. Very often one finds that the policies that have been adopted for correcting a difficulty are actually intensifying it rather than producing a solution.

Choosing an ineffective or detrimental policy for coping with a complex system is not a matter of random chance. The intuitive processes will select the wrong solution much more often than not. A complex system - a class to which a corporation, a city, an economy, or a government belong - behaves in many ways quite the opposite of the simple systems from which we have gained our experience."

Onze intuïtieve responsies zijn n.l. een gevolg van onze ervaringen met wat in technische termen een eerste-orde-negatief-feedbacksysteem heet. Een dergelijk systeem is doelgericht en bestaat uit één toestandvariabele. Wanneer men bijvoorbeeld zijn handen wil warmen aan een kachel, zal men ze op die afstand er van houden zodat men zich niet brandt, maar ook niet zo ver dat men te weinig warmte voelt. De toestandvariabele is in dit geval de afstand van de handen t.o.v. de kachel. Intuïtief leren we dat oorzaak en gevolg nauw met elkaar samenhangen in tijd en ruimte. De temperatuur hangt af van de afstand t.o.v. de kachel. Te veel of te weinig warmte is duidelijk afhankelijk van de positie van de handen.

Op overeenkomstige manier leren we dat bij lopen, fietsen en autorijden, oorzaak en gevolg zich voordoen op ongeveer dezelfde tijd en plaats. Forrester (1969) vindt echter dat in complexe systemen, oor-

zaak en gevolg niet nauw verbonden zijn in tijd en ruimte. De structuur van een complex systeem is niet een eenvoudige feedbackloop waarin een toestandvariabele het gedrag van het geheel domineert. Het complexe systeem heeft een veelvoud van onderling samenhangende feedbackloops en de decisievariabelen zijn niet lineair. Het complexe systeem is van hogere orde, wat betekent dat er veel toestandvariabelen een rol spelen. Gewoonlijk bestaat zo'n systeem zowel uit positieve feedbackloops die groeiprocessen beschrijven, als uit negatieve loops, die doelgericht gedrag vertonen.

In complexe systemen kan de oorzaak van een moeilijkheid of niet gewenst gedrag, ver terug in de tijd gescheiden liggen van de symptomen, of in een geheel verschillend en ver verwijderd deel van het systeem. Gewoonlijk worden oorzaken niet gevonden in vroegere gebeurtenissen maar in de structuur en het beleid van het systeem. Wat de zaak nog moeilijker maakt is dat een complex systeem veel meer misleidend is dan dat het enkel oorzaken verbergt. Wanneer men zoekt naar een oorzaak, die in tijd en ruimte dichtbij een symptoom ligt, vindt men gewoonlijk dat datgene wat plausibel lijkt, vaak niet de oorzaak is. Dikwijls vertoont een complex systeem schijnbare oorzaken die in feite coincidente symptomen zijn. De hoge graad van samenhang in de tijd tussen variabelen in complexe systemen kan er toe leiden dat we oorzaak-gevolg relaties leggen tussen variabelen die eenvoudigweg tegelijkertijd veranderen, als deel van het totale dynamische gedrag van het systeem. Forrester (1969) concludeert dan:

"Conditioned by our training in simple systems, we apply the same intuition to complex systems and are led into error. As a result we treat symptoms, not causes. The outcome lies between ineffective and detrimental".

Samenvattend kunnen we stellen dat deze aanpak het de onderzoeker mogelijk maakt op basis van een te

onderkennen structuur, een model te ontwikkelen dat inzicht geeft in de dynamische karakteristieken van het onderzochte systeem. Tevens leren de ervaringen met het bestuderen van feedback modellen van complexe systemen, dat onze intuïtie misleidend is.

### 3.3 Kenmerken van systeem-dynamische modellen

Deze mathematische modellen zijn, in tegenstelling tot statische modellen, dynamisch, dat wil zeggen de interacties tussen de variabelen variëren met de tijd. Verder kunnen we de modellen van systemen indelen volgens de volgende criteria (Forrester, 1961):

- lineair vs nonlinear
- open vs gesloten.

Dit onderscheid heeft te maken met het model. Wanneer men let op het gedrag kan men modellen ook nog onderscheiden volgens:

- stabiel vs onstabiel
- "steady state" vs "transient".

#### 3.3.1 Lineair vs nonlinear

Een model is lineair wanneer het de volgende eigenschappen heeft:

Def.: Indien een input  $X_1(t)$  een output  $Y_1(t)$  tot gevolg heeft en een input  $X_2(t)$  een output  $Y_2(t)$ , genereert een input  $C_1 X_1(t) + C_2 X_2(t)$  een output  $C_1 Y_1(t) + C_2 Y_2(t)$  voor alle paren van inputs  $X_1(t)$  en  $X_2(t)$  en voor alle paren van constanten  $C_1$  en  $C_2$ .

In deze definitie zitten twee eigenschappen:

$$1. \text{ additiviteit } L(X_1 + X_2) = LX_1 + LX_2 \quad (3.1)$$

$$2. \text{ commutativiteit } L(CX) = CLX \quad (3.2)$$

Op de additiviteitseigenschap berust het superposi-

tie beginsel.

Volgens Zadeh en Desoer (1963) zijn deze twee eigenschappen niet voldoende omdat men voorbeelden kan bedenken van systemen die lineair zijn onder beide genoemde condities en toch duidelijk niet-lineair gedrag vertonen wanneer gestart wordt vanuit een andere begintoestand dan de nul-toestand. De gegeven definitie gaat alleen op voor een systeem dat vertrekt vanuit de nul-toestand (zero-state linearity).

Om te komen tot een meer algemene en stricte definitie van lineariteit, onafhankelijk van de beginconditie van het systeem, komen Zadeh en Desoer tot de volgende stelling:

Indien het systeem  $S$  lineair is in de nul-toestand, dan is het ook lineair met betrekking tot alle begintoestanden die vanuit de nul-toestand bereikbaar zijn.

Naast deze nul-toestand lineariteit eisen Zadeh en Desoer ook nog dat, wil een systeem lineair zijn, het voldoet aan de nul-input lineariteit. Ze definiëren de nul-input lineariteit als volgt:

Stel het systeem  $S$  heeft een toestandruimte die een lineaire vectorruimte is. Dan is  $S$  nul-input lineair indien zijn nul-input respons een homogene en additieve functie is van de begintoestand.

Op deze wijze komen ze tot de algemene definitie van lineariteit, die zowel de nul-toestand als de nul-input lineariteit veronderstelt. Deze definitie luidt:

Een systeem  $S$  is lineair slechts indien:

1.  $S$  lineair is met betrekking tot alle mogelijke begincondities
2.  $S$  nul-input lineair is.

### 3.3.2 Open vs gesloten

Een gesloten dynamisch systeem functioneert zonder verbindingen met variabelen die van buitenaf be-

paald worden. (Deze definitie stemt overeen met de definitie in Hoofdstuk II). Een gesloten systeem genereert intern de waarden van de variabelen afhankelijk van de tijd, door de interactie tussen die variabelen onderling. Informatie feedbacksystemen zijn volgens Forrester in wezen gesloten systemen. Ze sturen zichzelf en die kenmerken zijn van belang die voortkomen uit de interne structuur van de interacties. Systemen zonder input worden ook wel genoemd: "free running".

Responsies op externe inputs zijn van veel minder belang. Open en gesloten systemen zijn de uiteinden van een continuüm. Aan systemen kan men overeenkomstig dit continuüm graden van openheid of geslotenheid toekennen.

Een gesloten systeem in de zin van Forrester betekent dus dat het gesloten is wat betreft het informatienetwerk. Forrester gebruikt echter ook test-inputs die dienen als een stimulus voor de interne responsies van het systeem. Dergelijke externe inputs zijn slechts valide onder de condities dat we aannemen dat ze geheel onafhankelijk zijn van de responsies van het systeem.

### 3.3.3 Stabiel vs onstabiel

Dynamische modellen, en dus ook de systemen die ze voorstellen, kunnen zowel stabiel als niet stabiel zijn. Een stabiel systeem keert terug tot de begincondities nadat het uit zijn evenwicht is gebracht. Het kan over zijn doel heen schieten (overshoot) of oscilleren, maar de storing neemt af en dooft uit. Een niet stabiel systeem dat in evenwicht wordt gestoord, versterkt de verstoring. Dit leidt tot groei of oscillaties waarvan de amplitude toeneemt. Een nonlinear systeem dat niet stabiel is onder normale condities, kan fluctuaties vertonen die groeien totdat ze beperkt worden door andere nonlineaire invloeden. De bestaande



fluctuaties kunnen dan beschouwd worden als stabiel met constante amplitude. Forrester geeft als voorbeeld economische systemen, waarvan de bovengrenzen van de activiteit beperkt worden door de grondstoffen en de lagere activiteitsgrens door nul-activiteit.

### 3.3.4 "Steady state" vs "transient"

Een "steady state" gedrag herhaalt zich in de tijd, terwijl het gedrag in een periode van dezelfde aard is als in een andere. "Transient" gedrag beschrijft die veranderingen waar de aard van het systeem verandert in de tijd. Een systeem dat groeit of teruggang vertoont, toont "transient" gedrag. Transient gedrag is eenmalig. Sociale systemen vertonen over het algemeen een transient gedrag en slechts in zeer beperkte gevallen kan een steady state gedrag worden waargenomen.

### 3.3.5 Analytische vs numerieke oplossing

De theorie van de lineaire servomechanismen is sinds de tweede wereldoorlog sterk ontwikkeld en toegepast op zeer veel verschillende systemen. Deze ontwikkeling is van grote invloed geweest op het proces van de automatisering. Ook systemen die in feite nonlineair zijn werden door middel van deze theorie bestudeerd, waarbij men benaderingsmethoden of kwasi-lineaire modellen hanteerde. Op enkele uitzonderingen na is de mathematische analyse nog niet in staat gebleken algemene oplossingen te bieden voor niet-lineaire systemen (Forrester, 1961, 1968). Wanneer men een benaderingsmethode toepast om niet-lineaire systemen te kunnen bestuderen met behulp van analytische oplossingen afkomstig uit de lineaire feedbacktheorie, gaan de niet-lineaire kenmerken verloren. We zijn van mening dat het gebruik maken van de lineaire feedbacktheorie zeer nuttig is, omdat ze ons in staat

stelt systemen te bestuderen met een zeer goed ontwikkelde theorie. Men accepteert het verlies van de niet-lineaire aspecten van een systeem om gebruik te kunnen maken van een grote hoeveelheid kennis. Voor de bestudering van sociale systemen, die duidelijk niet lineair zijn, kan lineariseren een groot nadeel zijn omdat daarmee zeer typische eigenschappen verloren gaan. Voor een louter technisch systeem is dit bezwaar minder belangrijk omdat men het door technische ingrepen redelijk goed onder controle kan houden. Wanneer men blijft vasthouden aan lineaire modellen, vanwege hun mathematische elegantie, betekent dit op den duur een remming op de bestudering van sociale systemen, omdat men te weinig rekening houdt met de empirie.

Forrester is afgestapt van de eis dat men moet zoeken naar algemene oplossingen als uitkomst van een stelsel van differentiaalvergelijkingen. Deze stap terug in de mate van abstractie biedt hem echter de mogelijkheid zowel lineaire als niet-lineaire feedbacksystemen te bestuderen, daarbij gebruik makend van eenzelfde benaderingswijze. Deze aanpak stelt ons in staat bijzondere oplossingen te verkrijgen voor elke gespecificeerde verzameling van omstandigheden.

Wanneer we in staat zijn een systeem te beschrijven in termen van vergelijkingen, die aangeven hoe we moeten starten, uitgaande van een of andere beginconditie van het systeem en vervolgens de toestand berekenen die korte tijd later zal volgen, hebben we een methode om stapsgewijs het gedrag van het systeem te ontvouwen. Deze stapsgewijze oplossing wordt simulatie genoemd.

De vergelijkingen, d.w.z. de instructies voor het berekenen van de volgende stap in de tijd worden in het algemeen een simulatiemodel genoemd. Voor een relatief eenvoudig simulatiemodel, bijvoorbeeld een tweede-orde-negatief-feedbacksysteem, is deze

stapsgewijze rekenwijze reeds tijdrovend.

Wordt het model complexer en de tijd langer waarover het gedrag moet worden berekend, dan is het al zeer snel een onbegonnen werk.

Dit argument heeft voor 1940 een belangrijke rol gespeeld wat betreft het gebruik van simulatiemodellen. Door de introductie van de computer, die op zeer goedkope wijze een zeer complex systeem kan simuleren, is dit bezwaar opgeheven.

Forrester (1968) concludeert:

"Most dynamic behavior in social systems can only be represented by models that are nonlinear and so complex that analytical mathematical solutions are impossible. For such systems, only the simulation process using step-by-step numerical solution is available."

In het algemeen kan men dus stellen dat Forrester het dynamische gedrag bestudeert van complexe non-lineaire feedbacksystemen met behulp van de digitale computer.

### 3.4 Eisen voor het formuleren van dynamische systeemmodellen

Forrester (1961) is van mening dat een mathematisch model een nuttige leidraad moet zijn om te kunnen oordelen en intuïtieve beslissingen te nemen. Het gebruik van modellen moet dan het volgende inhouden:

- We hebben enige kennis over de bijzondere kenmerken van het systeem.
- Deze bekende en aangenomen feiten hangen onderling samen en beïnvloeden aldus de manier waarop het systeem zich over de tijd zal ontwikkelen.
- Onze intuïtieve vaardigheid om de interactie tussen de delen te visualiseren is minder betrouwbaar dan onze kennis van de delen afzonderlijk.
- Door het construeren van een model en het ob-

serveren van het samenspel tussen de factoren, zullen we een beter inzicht krijgen in het systeem waarin we geïnteresseerd zijn.

Een geschikt model van een systeem moet dan ook in staat zijn de aard van het systeem voor te stellen. Forrester maakt duidelijk dat specifieke gebeurtenissen op een bepaald moment in de toekomst, niet in de eisen voor een model zijn opgenomen. Hij zegt:

"It has often been erroneously taken as self-evident that a useful dynamic model must forecast the specific condition of the system at some future time. It may be desirable, but the usefulness of models need not rest on their ability to predict a specific path in the future."

Zoals we nog zullen zien heeft deze opvatting duidelijke konsekwenties voor de eisen te stellen aan de validiteit van een model.

Veelal merkt men in de sociale wetenschappen dat het mogelijk nut van modellen wordt betwist en men baseert zich dan op de assumptie dat te weinig data voor handen zijn waarop een model gebaseerd kan worden. Gewoonlijk begint men daarom met uitgebreid statistische data te verzamelen en hoopt vervolgens wetmatigheden te ontdekken. Dit is naar onze mening een verkeerde onderzoeksstrategie.

Naar onze mening is het niet mogelijk een zinnig onderzoek op te zetten, wanneer men niet van tevoren een theorie heeft ontwikkeld die het mogelijk maakt de verkregen data te interpreteren. Dit betekent dat men moet starten met een model. Vervolgens kan men vaststellen welke gegevens men moet verzamelen. Een model levert een zoekstructuur die ons in staat stelt zeer belangrijke en vaak gemakkelijk verkrijgbare informatie te verzamelen, die zonder dit hulpmiddel licht over het hoofd wordt gezien. Het uitgebreid verzamelen van data leidt niet tot nieuwe inzichten in de algemene aard van de variabelen. In dit licht bezien is er niet veel verschil tussen een verbaal model en een mathema-

tisch model. Beide zijn namelijk abstracte beschrijvingen van het systeem. Het mathematisch model is scherper gedefinieerd en minder vaag, maar het is niet noodzakelijk nauwkeuriger dan het verbale model; de mate van overeenkomst met de werkelijkheid hoeft niet groter te zijn. Het tegendeel kan waar zijn.

Het voordeel dat een mathematisch model oplevert is dat het formuleren er van de onderzoeker dwingt zich zeer duidelijk uit te drukken. Dit betekent dat een model een zeer belangrijk hulpmiddel is voor ons inzicht in en ons denken over het betreffende systeem. We zullen er nader op ingaan aan de hand van de modelcyclus zoals hij door Forrester werd geformuleerd. Hij deelt de cyclus in in de volgende fasen:

- 1 probleemstelling
- 2 descriptief model
- 3 formalisering
- 4 analyse van de runs van het simulatiemodel
- 5 vergelijken van het model met gegevens van het onderzochte systeem
- 6 aanpassen van het model zodat het voldoende overeenstemming vertoont met het feitelijk systeem
- 7 onderzoeken welke veranderingen in het model een verbetering betekenen van het gedrag van het systeem
- 8 aanpassen van het onderzochte systeem overeenkomstig de resultaten van het onderzoek.

Voor onderzoek naar sociale systemen blijkt dat vooral de stap van de descriptieve fase naar de formalisering zeer cruciaal is. Vaak blijkt dan namelijk dat variabelen niet goed of te vaag zijn gedefinieerd en dat onderlinge relaties tussen de variabelen niet of nauwelijks zijn geformuleerd. Tijdens de formalisering kan ook blijken dat de grens tussen systeem en omgeving onjuist is gelegd en dat herdefiniëring zinvoller is. Naarmate de beschrij-

ving van het systeem beter is, zal de formalisering makkelijker verlopen. Dit betekent dat wanneer men uitgaat van een feedback model als abstract model, men voor het maken van een descriptief moet letten op 3 aspecten.

1. Isoleer de factoren die van belang schijnen te zijn als veroorzakers van de waargenomen symptomen.
2. Speur de oorzaak en gevolg relaties op die in een feedbackloop vervat liggen, d.w.z. zoek naar beslissingen die acties tot gevolg hebben, die op hun beurt een informatiestroom veroorzaken die weer uitmondt in een nieuwe beslissing.
3. Formuleer aannemelijke formele beslissingsregels die moeten aangeven hoe decisies het resultaat zijn van de beschikbare informatiestroom.

Kenmerkend voor de sociale wetenschappen is dat men bij het gebruik van het systeemconcept veelal blijft steken in de verbale fase. Het gebruik van het begrip "systeem" dient dan slechts om te verwijzen naar een veronderstelde samenhang. Welke samenhang verondersteld wordt, wordt niet geëxpliciteerd en doordat men zich niet dwingt tot formaliseren, verkrijgt men geen feedback over de bruikbaarheid van de gehanteerde concepten. Dit is vooral van belang wanneer we ons inzicht in het systeem willen vergroten. Door het construeren van een mathematisch model, worden we gedwongen duidelijk te maken wat het relatieve belang is van de verschillende factoren. Gevolg is dat we tegenstrijdigheden ontdekken in onze assumpties. Forrester (1961) zegt hierover:

"We shall often find that our assumptions about the separate components cannot lead to our expected consequences. Our verbal model, when converted to precise mathematical form, may be inconsistent with the qualitative nature of the

real world we observe around us."

Een model moet starten met een structuur die de algemene aard van de onderlinge relaties weergeeft. Assumpties over de structuur moeten van te voren gemaakt worden, voordat we kunnen beginnen met het verzamelen van data van het systeem. Wanneer we een aannemelijke structuur hebben die overeenstemt met onze descriptieve kennis van het systeem, kunnen we vervolgens aan de verschillende coëfficiënten numerieke waarden toekennen, omdat deze onderscheidbare en beschrijfbare karakteristieken van het systeem moeten voorstellen. Het ontwerpen van een model moet volgens Forrester niet worden uitgesteld totdat alle betreffende parameters voldoende nauwkeurig zijn gemeten. Hij is van mening dat die dag nooit zal komen. We moeten waar dit nodig is de waarden van variabelen schatten, zodat we voort kunnen gaan met het ons verschaffen van inzicht, terwijl we tevens voortgaan met het verzamelen van gegevens. Forrester (1961) merkt op:

"To some, this attitude toward the data on which to base a model will seem highhanded and will be repugnant. To others, it will seem the practical and necessary avenue along which to attack a difficult problem."

De opvatting dat een model eerst moet bijdragen tot het zich inzicht verschaffen en dat het vervolgens pas als middel dient voor predictie, is in de natuurwetenschappen en in de technologie gebruikelijk. In de testpsychologie, met name daar waar gebruik wordt gemaakt van predictieve validiteit, staat de predictie centraal zonder dat het gebruik leidt tot betere inzichten in het menselijk handelen. Het op deze manier hanteren van onderzoek heeft in de testpsychologie snel succes opgeleverd. Wanneer men deze aanpak echter verheft tot voorbeeld van handelen voor de psychologie, kan dit op de lange duur slechts leiden tot een falen. De kans is dan

reëel dat andere disciplines haar taak overnemen om ons een inzicht te verschaffen in het menselijk gedrag.

### 3.5 De beoordeling van de validiteit van een model

Forrester (1961) merkt op:

"The significance of a model depends on how well it serves its purpose."

De bruikbaarheid van een model hangt op de eerste plaats af van de begrenzing d.w.z. het onderscheid van systeem en omgeving. Op de tweede plaats hangt het af van de toepasselijkheid van de gekozen variabelen en tenslotte van de numerieke waarden van parameters (Forrester, op. cit.). Het prediceren van de toestand van het onderzochte systeem op een bepaald toekomstig tijdstip, is volgens Forrester geen juiste toets voor het nut van het model. Ook is hij van mening dat het in feite onmogelijk is een goed bewijs te vinden voor het vaststellen van de validiteit van een model.

"There is no absolute proof but only a degree of hope and confidence that a particular measure is pertinent in linking together the model, the real system and the purpose." (Forrester, 1968a).

Bij het ontwikkelen van een systeemmodel is de eerste en belangrijkste keuze, de juiste afgrenzing van systeem en omgeving. Deze is vooral afhankelijk van de doelstelling van het onderzoek. Worden de grenzen te nauw gelegd dan kan het model niet alles verklaren waarin men geïnteresseerd is, d.w.z. alle vragen in het licht van de doelstelling kunnen niet beantwoord worden. Liggen de grenzen te wijd, dan genereert het model veel meer gedragingen dan men in het licht van de doelstelling wenst. In dat geval werkt het model eerder verwarrend dan informatief. Het probleem is dat men vooraf vaak niet kan zien of de grenzen te nauw of te wijd zijn,



en omdat er geen theorie bestaat die daar uitsluitend over kan geven, is de keuze vooralsnog afhankelijk van de opvatting van de onderzoeker en dus voor een deel gebaseerd op ervaring. Reeds vanaf de start kan er veel verschil van mening bestaan over de juistheid van het model, uitgaande van de keuze van de grens tussen systeem en omgeving.

De tweede belangrijke stap ligt in de keuze van de variabelen en de onderlinge relaties tussen die variabelen.

Volgens Forrester (1961) ligt de grootste moeilijkheid vooral in de keuze van de decisiefuncties, waarvoor gewoonlijk geen numerieke data voorhanden zijn om ze te verifiëren. Dit betekent dat het model geconstrueerd moet worden uit descriptieve informatie. Het is vaak moeilijk decisiefuncties te onderkennen, omdat ze bij metingen onder het ruisniveau van het betreffende kanaal liggen of omdat de feedback informatie hoog correleert met andere variabelen. Het kan ook zijn dat de grootte van de invoer in een decisiestroom niet nauw samenhangt met zijn invloed in het dynamische gedrag van het systeem. De fase en tijdelijke aard van variabelen kunnen van veel grotere invloed zijn. Forrester (1961) illustreert dit laatste aan de hand van een "customer-producer-employment system" (1961, H. 18), waarbij een feedback signaal van de orders van de klant een van de noodzakelijke oorzaken is van de grote fluctuaties in de werkgelegenheid bij de producent. Deze fluctuaties zijn een gevolg van de variërende looptijden in het afleveren van de goederen door de producent. Ook t.a.v. de keuze van de inhoud van het model bestaan nog geen bruikbare principes en wat betreft de bestudering van industriële systemen zegt Forrester dat de meest bruikbare modellen worden ontwikkeld door diegenen die het feitelijke systeem kennen en tegelijkertijd kennis hebben van dynamische systeem analyse.

Siegel (et. al., 1969) zegt over de inhoudelijke validiteit van simulatiemodellen het volgende:

"For most models a quantitative measure of the sufficiency of the content validity of the model will not be feasible. Obviously it is not possible to include every aspect of the real world into a simulation model.

Hence a degree of judgement is required in terms of which aspects to simulate and having selected aspects believed most salient, which parts of the selected aspects to include. While it is not feasible to state the content validity of a model quantitatively, it seems that the model builder should be careful to state why he thinks that his model possesses content validity and which aspects of the situation simulated are not included in the model."

Forrester en Siegel, die beiden een ruime ervaring hebben m.b.t. deze problematiek, komen tot overeenkomstige conclusies.

Volgens welke criteria moet een model op validiteit getoetst worden?

In het algemeen kan men stellen dat hoe moeilijker het gedrag van het model te onderscheiden is van het gedrag van het systeem, des te meer vertrouwen zal men stellen in het model. Op zichzelf beschouwd is de overeenkomst tussen model en systeem een noodzakelijke maar niet voldoende voorwaarde voor de validiteit van het model.

Welke toetsen kan men hanteren om de overeenkomst tussen systeem en model te bepalen? Forrester (1961) maakt gebruik van de volgende stappen.

De eerste toets is, dat het modelgedrag niet duidelijk afwijkt van het gedrag van het systeem. Hoewel dit criterium nogal dwaas lijkt omdat het zo vanzelfsprekend is, zal men bij het ontwikkelen van een model gewoonlijk op problemen stuiten die het model weinig plausibel maken. Bijvoorbeeld, variabelen

kunnen grenzen overschrijden, wat in het werkelijk systeem niet mogelijk is, toestandvariabelen kunnen negatieve waarden aannemen wat fysisch of conceptueel niet mogelijk is. Gewoonlijk zijn de oorzaken snel aan te wijzen.

Bij de tweede toets tracht men onjuistheden in het model te vinden door het te testen onder zeer uiteenlopende extreme omgevingscondities, die echter binnen de doelstellingen van het onderzoek vallen. Zijn op deze wijze de meest opvallende tekorten uit het model weggewerkt, dan kan men zich meer gaan richten op de fijnere gedragskarakteristieken. Wanneer er fluctuaties optreden dan zijn de meest voor de hand liggende kenmerken, de intervallen tussen de piekwaarden van de variabelen van het model, die vergeleken worden met die van het systeem. Zijn er grote verschillen tussen model en systeem, dan kan dit wijzen op verkeerde waarden van de coëfficiënten of op een te gebrekkige structuur van het model.

De tijd- en faserelaties tussen de variabelen geven vaak aan in welke mate model en systeem overeenkomen, waarbij men gebruik maakt van de vroegere gegevens over het systeem. Wanneer er belangrijke aspecten uit de beslissingsregel van het model zijn weggelaten, kan men in een modelrun condities aantreffen die men niet reëel beschouwt in het systeem.

Dit kan aanleiding zijn tot het vinden van factoren die oorspronkelijk in het model waren weggelaten. Nauw samenhangend met de fase en periodiciteit is de abruptheid waarmee de waarden van de systeemvariabelen veranderen, en het model moet in staat zijn deze snelle overgangskennmerken te kunnen nabootsen.

Wanneer men eenmaal de algemene kwalitatieve aard van een bepaald verschijnsel in een model heeft ingebouwd en dit redelijk goed heeft benaderd, is het

vrij makkelijk aan te passen aan elke gewenste waarde door de parameters te veranderen in het model. Het ontwikkelen van een model dat zeer nauwkeurig past bij het systeem, is volgens Forrester (1961) geen garantie dat het van invloed is op het ontwerpen van een beter systeem. De veranderingen in het ontwerp zijn niet afhankelijk van een dergelijke nauwkeurige kennis van het systeem, ze zijn afhankelijk van die relaties in het model die verantwoordelijk zijn voor de redelijke benadering van de belangrijke systeem kenmerken.

Het belangrijkste doel van het vergelijken van model en systeem is om aan te tonen dat men in staat is het gedrag van het systeem na te bootsen. Het resultaat van deze validatie zal dan zijn dat men vertrouwen heeft in de elementaire structuur van het model. In termen van de modelcyclus zal men dan ook vertrouwen hebben in de structuur van een verbeterd model en zal men vertrouwen hebben in de wijze waarop het systeem wordt veranderd op basis van de conclusies uit het model.

Tot nu toe hebben we vooral de nadruk gelegd op het hanteren van een model om in het systeem veranderingen of verbeteringen te kunnen aanbrengen. Het gebruik van een model kan ook ten doel hebben het gedrag van een systeem te reproduceren, enkel en alleen om zich meer inzicht te verschaffen in de onderzochte werkelijkheid. Het is echter steeds mogelijk met een model een tijdsafhankelijk patroon na te bootsen dat zeer veel overeenkomst vertoont met historische data van het systeem. Men kan met behulp van zogenaamde "curve-fitting" methoden elke curve redelijk goed nabootsen. Dit hoeft echter niet te betekenen dat men zich enig inzicht verschaft in de structureel-functionele eigenschappen van het systeem. Als middel tot verwerven van inzicht en kennis kan een dergelijke procedure zeer misleidend zijn omdat er geen enkele garantie

bestaat dat de aard van het modelgedrag overeenkomt met gegevens die buiten de periode vallen waarop model en systeem op elkaar zijn aangepast.

Een dergelijke formele procedure zal dus gepaard moeten gaan met een motivering waarom het model de oorzaken kan aanduiden voor het systeemgedrag. Bij het ontwikkelen van een dynamisch model van een systeem, zal men steeds dienen aan te geven welke causale mechanismen van belang zijn voor het bepaalde gedrag van het systeem. Men kan ook stellen dat een formele procedure van het aanpassen van het model aan gegevens van het systeem, zonder dat aangegeven wordt welke causale mechanismen een rol spelen, inhoudelijk arm is en, omdat ze geen nieuwe inzichten oplevert, weinig relevant.

In hoeverre is het juist van een model te eisen dat het in staat moet zijn de toestand van het systeem op een bepaald moment te kunnen voorspellen?

Forrester (1961) geeft als voorbeeld het zonnestelsel, dat in zijn terminologie een open systeem is, want een planeet komt niet in zijn oorspronkelijke baan terecht via een terugkoppelingsmechanisme, nadat hij door een passerend hemellichaam uit zijn positie is gebracht. Het is een systeem waarvan de toekomstige specifieke toestand niet verstoord wordt door de kennis die wij er van te voren van hebben. (We wijzen er nogmaals op dat Forrester een feedbacksysteem beschouwt als een gesloten systeem wat betreft zijn informatienetwerk).

Het nut van een model van het zonnestelsel is juist het kunnen voorspellen van toekomstige gebeurtenissen als winter, zomer, zonsverduistering e.a. De juistheid van dat model wordt afgelezen uit de fout tussen voorspelling van tijd en plaats van de bepaalde gebeurtenis en de feitelijke observatie.

Een sociaal systeem is in dit opzicht anders van aard. Er zijn veel mechanismen in te onderkennen die wijzen op een terugkoppelingsmechanisme, ter-

wijl er tevens doelgerichte aspecten een belangrijke rol spelen. Een belangrijk kenmerk van sociale systemen is dat er veel factoren op van invloed zijn, die naar aard en gedragskarakteristieken, niet begrepen en niet voorspelbaar zijn.

Al deze onbekende invloeden die worden aangeduid met de naam ruis, vertonen volgens Forrester veel overeenkomsten met de krachten waar men wel enig zicht op heeft. De toekomstige toestand van een sociaal systeem wordt dus bepaald door bekende en onbekende factoren. Forrester (1961) merkt hier het volgende over op:

"Even though stable organizational structure, policies, and human reactions exist and these determine the principal dynamic characteristics of a system, we can not assume a perfect model in which every relationship is known exactly. Therefore, we are committed to models in which every decision function has, at least in principle, a noise or uncertainty component."

Hij vervolgt met:

"From a consideration of the nature of the components and structure of social systems, it appears that we should not soon expect models that can be useful in predicting specific future system state. This type of prediction of future state is possible only to the extent that the correctly known laws of behavior predominate over the unexplained noise. In the model of the solar system the noise components of force on the bodies are vanishingly small compared with those forces which can be explained. In social systems this is not true."

Deze redenering kan misschien opgaan voor complexe sociale systemen zoals bedrijven, steden e.d., hoewel we van mening blijven dat een zekere predictie, al is het slechts door middel van een "split-half", moet kunnen worden uitgevoerd.

Wat betreft ons onderzoek zullen we het ontwikkelde model wel toetsen.



moeten hebben in termen van het onderzochte systeem. Alle variabelen en parameters moeten een conceptuele betekenis hebben, die ieder voor zich bekeken kunnen worden met betrekking tot het systeem. Dit betekent dat de gehanteerde constructen ook valide moeten zijn.

### 3.6 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn we ingegaan op de aanpak van J.W. Forrester. Hij gaat uit van de feedbacktheorie, maar doordat hij de eis laat vallen dat zijn methode algemene oplossingen moet genereren, die langs analytische weg verkregen zijn, is hij in staat zowel lineaire als niet-lineaire systemen te bestuderen. Hij verkrijgt op deze wijze numerieke in plaats van analytische oplossingen. Omdat hij hierbij gebruik maakt van simulatie door middel van de digitale computer, is hij in staat zeer complexe systemen te bestuderen.

Tevens zijn we ingegaan op de problemen rond het formuleren van dynamische modellen.

Tenslotte zijn we gestoten op het moeilijke probleem van het valideren van simulatiemodellen van sociale systemen. In deze paragraaf werd een problematiek aangesneden die van zeer groot belang is voor de sociale wetenschappen. De manier van denken, zoals ze in deze paragraaf (3.5) naar voren komt, is een grote uitdaging aan de opvattingen waarop de testpsychologie steunt.

Tot nu toe zijn de behandelde onderwerpen algemeen van aard geweest. In het volgende hoofdstuk zullen we ons gaan bezig houden met een ontwikkeling die nauw verwant is met de voorgaande stof en er veel parallellen mee heeft. Ze heeft bekendheid gekregen onder de naam automatisering en heeft grote veranderingen te weeg gebracht in de taakhoud van de operators.



## HOOFDSTUK IV

### AUTOMATISERING EN DE TAAK VAN DE OPERATOR IN DE PROCESINDUSTRIE

#### 4.1 Automatisering

In het eerste hoofdstuk hebben we vermeld dat de tweede industriële revolutie vooral werd gekenmerkt door de informatieverwerking en dat ze samenhangt met de opkomst van de cybernetica. Een ontwikkeling die hiermee verwant is staat bekend onder de naam automatisering. Over de interpretatie ervan zijn de meningen nogal uiteenlopend. Een groep ziet automatisering voornamelijk in termen van organisatorische veranderingen, een andere groep let meer op de technische kenmerken van geautomatiseerde apparatuur. Davis, D.J., (1959), zegt ervan:

"Automation is the result of nothing more than better planning, improved tooling, and the application of more efficient manufacturing methods which take full advantage of the progress made by the machine tool and equipment industries."

De groep die bij de definitie van automatisering vooral let op de technische aspecten benadrukt de sensorische capaciteiten voor het genereren van informatie, d.i. de rol van de meetapparatuur, de rol van de regelapparatuur en de integratie van de informatietechnologie (computers) met productietechnologie (Sultan, P.E., Prasow, P., 1964). Rogers, J., (1958), geeft als definitie:

"Automation contemplates the wholesale reproduction of the sensory and mental functions of human operators in production systems which go far beyond the fixed sequence-fixed operation variety of automatic production."

Jaffe, A.J. en Fromkin, J. (1968), geven een korte omschrijving van automatisering:

"(Automation.) This term should be reserved for that type of production process utilizing the automatic or feed-back principle, in which a control mechanism triggers an operation after taking into account what has happened before. The feedback principle generally distinguishes automation from mechanization."

Automatisering in deze zin kan worden opgevat als volledig geautomatiseerd of automatisch of als gedeeltelijk geautomatiseerd. In een automatisch proces is de menselijke interventie bij de besturing en bewaking uitgeschakeld.

Dit is niet het geval bij een geautomatiseerd proces. Als gevolg van dit onderscheid ligt het voor de hand graden van geautomatiseerd zijn van processen te onderscheiden.

Dit betekent bijvoorbeeld dat de grenzen waarbinnen mechanische of chemische processen automatisch gestuurd, gecontroleerd en gecorrigeerd worden, zonder dat er sprake is van menselijke tussenkomst, variabel zijn. Zijn deze grenzen nauw dan is het proces weinig geautomatiseerd, zijn de grenzen wijd dan is er sprake van verregaande automatisering. Daar we enkel geïnteresseerd zijn in die processen waarbij menselijke interactie van belang is, zullen we ons verder bezig houden met geautomatiseerde processen.

Volgens Foster (1968) bestaat er nog geen volledig geautomatiseerde fabriek en is het niet waarschijnlijk dat dit in de nabije toekomst het geval zal zijn. We hebben dus redenen genoeg om ons verder in dit probleem te verdiepen.

In een geautomatiseerd proces zullen we steeds terugvinden het materiële proces, de conventionele meet- en regelapparatuur en/of de computer en de mens. Zowel de meet- en regelapparatuur als de computer en de mens besturen het proces. Dit betekent dat de mens en de controle-apparatuur elkaar zodanig

moeten aanvullen dat de besturing zo goed mogelijk verloopt. Dit complementair zijn van mens en machine is een belangrijke zienswijze die door Jordan (1963) en Whitfield (1967) wordt benadrukt als reactie op de door Fitts (1951) gepubliceerde lijst die gebaseerd is op het vergelijken van de relatieve voor- en nadelen van menselijke functies en machine-functies. Ze past ook beter in het beeld dat met name de computer een deel is van onze cultuur en dat hij juist gemaakt is voor het uitvoeren van die functies waarin de mens zwak is.

Impliciet is in de "Fitts-lijst" ingebouwd de visie dat mens en machine tegenover elkaar staan in een zekere rivaliteit. Overeenkomstig de opvatting van Jordan en Whitfield wordt de machine een verlengstuk van de menselijke mogelijkheden.

Omdat het van groot belang is dat mens en machine samen goed functioneren, wil de mens zo goed mogelijk gebruik kunnen maken van de eigenschappen van de machine, dient de interactie tussen mens en machine optimaal te zijn. Vanuit dit oogpunt kan men stellen dat de ergonomie en ook de systeempsihologie, gericht is op een artificiële wereld en gecentreerd is op het interface tussen mens en machine. Wat zijn de kenmerken van dit artificiële?

Simon, H.A. (1969), komt tot vier karakteristieken. Dit zijn:

- 1 kunstmatige dingen worden door de mens samengesteld;
- 2 kunstmatige dingen kunnen overeenkomsten vertonen met natuurlijke dingen, terwijl ze in andere opzichten ervan verschillen;
- 3 kunstmatige dingen kunnen gekarakteriseerd worden in termen van functies, doelen en aanpassing;
- 4 over artificiële dingen wordt vaak gediscussieerd, vooral wanneer ze ontworpen worden, in zowel imperatieve als descriptieve termen.

Terwijl de natuurwetenschappen zich bezig houden met het beschrijven van gebeurtenissen, is de techniek voornamelijk gericht op hoe zich iets moet gedragen om een bepaald doel te kunnen bereiken; de natuurwetenschappen zijn descriptief, de techniek is meer normatief.

Kunstmatige dingen zijn functioneel, d.w.z. ze moeten aangepast worden aan een doel. Dit betekent dat drie aspecten van belang zijn, te weten het doel, de aard van het artefact en de omgeving waarin het artefact functioneert.

Simon, H. (1969), beschouwt het artefact als een raakvlak of "interface" tussen een "binnenomgeving" en "buitenomgeving" (inner-environment respectievelijk outer-environment). Onder de binnenomgeving verstaat hij de structuur of organisatie van het artefact, onder de buitenomgeving, de omgeving waarin het artefact functioneert. Simon zegt dat wanneer de binnenomgeving geschikt is voor de buitenomgeving, of omgekeerd, het artefact aan het gestelde doel beantwoordt.

Wat levert een dergelijk onderscheid tussen binnen- en buitenomgeving op, wanneer we een adaptief of kunstmatig systeem bestuderen?

Volgens Simon stelt het ons in staat het gedrag te voorspellen van het systeem, waarbij we ons baseren op de kennis van het doel van het systeem en zijn buitenomgeving, met een minimaal aantal assumpties over de binnenomgeving. Ter verduidelijking geeft Simon het volgende voorbeeld. Wanneer we van een handelsorganisatie alleen weten dat het een systeem is dat maximale winst nastreeft, dan kunnen we vaak voorspellen hoe het gedrag zal veranderen bij een veranderende omgeving; hoe het de prijzen zal aanpassen wanneer de belastingdruk wordt verzwaaard. Een ander voordeel dat het onderscheid oplevert wat betreft de binnenomgeving, heeft te maken met het volgende. In vele gevallen zijn het slechts enkele

kenmerken van de buitenomgeving die van invloed zijn op het bereiken van een bepaald doel. Bij het ontwerpen van een artefact isoleert de ontwerper het "binnensysteem" van de omgeving, zodat een invariante relatie wordt gehandhaafd tussen het binnensysteem en doel, onafhankelijk van grote variaties in de meeste parameters die de buitenomgeving karakteriseren. Het zal opgevallen zijn, dat de essentie van het ontwerpen veel overeenstemming vertoont met de relatie tussen entropie, informatie, terugkoppeling en organisatie.

Het ontwerp is van zodanige aard dat men de entropietendenties tracht op te heffen. Men tracht het zoveel mogelijk invariant te maken van de omgeving door het een bepaalde structuur of organisatie te geven.

Simon komt tot eenzelfde opvatting:

"Quasi independence from the outer environment may be maintained by various forms of passive insulation, by reactive negative feedback (the most frequently discussed form of insulation), by predictive adaptation, or by various combinations of these."

Wanneer we de term "binnenomgeving" bij Simon vervangen door de term "systeem" past zijn redenering zeer goed in hetgeen in de hoofdstukken II en III is behandeld. Simon hoopt dat door adaptieve systemen op te splitsen in doel, buiten- en binnenomgeving, men in staat zal zijn de belangrijkste eigenschappen van het systeem en zijn gedrag te kunnen omschrijven zonder dat men nader heeft in te gaan op de buiten- en binnenomgeving. Vooralsnog klinkt het meer als een te verwachten ontwikkeling dan als een gerealiseerde werkelijkheid.

In welke verhouding staat het doel tot de binnen- en tot de buitenomgeving?

Simon merkt op dat de eigenschappen van de binnenomgeving ten dienste staan van het doel, in de context van de buitenomgeving. De buitenomgeving op haar beurt bepaalt de condities om dat doel te be-

reiken. Is het "binnensysteem" juist ontworpen dan zal het zich aanpassen aan zijn buitenomgeving. Vaak zal men echter genoeg moeten nemen met een ontwerp dat zijn doel slechts ten dele benadert. In dat geval zal het gedrag van het systeem slechts ten dele beantwoorden aan de taakomgeving omdat het afhankelijk is van beperkende eigenschappen van het "binnensysteem". In hoeverre gaat deze redenering op voor de automatisering?

#### 4.2 Enkele kenmerken van automatisering

Foster (1968) geeft twee definities van automatisering, die als uitgangspunt zullen dienen voor deze beschouwing. Zijn eerste definitie luidt:

"Automation is the replacement of human supervision of machines and mechanized processes by automatic supervision. Such automatic supervision must involve automatic means relating to 'recognition', 'target thinking', 'process thinking', 'program thinking', 'control thinking' and action."

De tweede luidt:

"The processes of material productivity or of services are all patterns of physical activity. To supervise and control them by automation, corresponding robot patterns must be established to operate faster than the physical patterns. Then the latter are anticipated, programmed and corrected."

In de eerste definitie maakt hij gebruik van menselijke functies om te verklaren wat hij onder automatisering verstaat. Hij kent aan de machine die de mens moet vervangen de volgende functies toe: waarneming, denken, geheugen en motoriek. In het Nederlands heet deze apparatuur toepasselijk meet- en regelapparatuur.

De tweede definitie omschrijft meer de eigenschappen die de besturingsapparatuur moet hebben. In algemene zin komt het er op neer dat deze een capaciteit moet

hebben om informatie te verwerken die minstens even groot is als de hoeveelheid informatie die het proces levert. Tevens, en dat is zeer belangrijk, moet deze apparatuur veel sneller werken dan het proces, wil de besturing effectief zijn. Dit laatste kenmerk wordt ook wel aangeduid met de naam *regelbaarheid* (controllability). Van der Grinten (1968) verstaat er onder de mate waarin het effect van storingen onderdrukt kan worden.

Wanneer we uitgaan van een volledig geautomatiseerd proces zal de output automatisch zo geregeld worden dat hij overeenkomt met een gestelde waarde, daarbij rekening houdend met de kenmerken van de input, zonder menselijke tussenkomst. Schematisch ziet het er als volgt uit (zie fig. 4.1.):

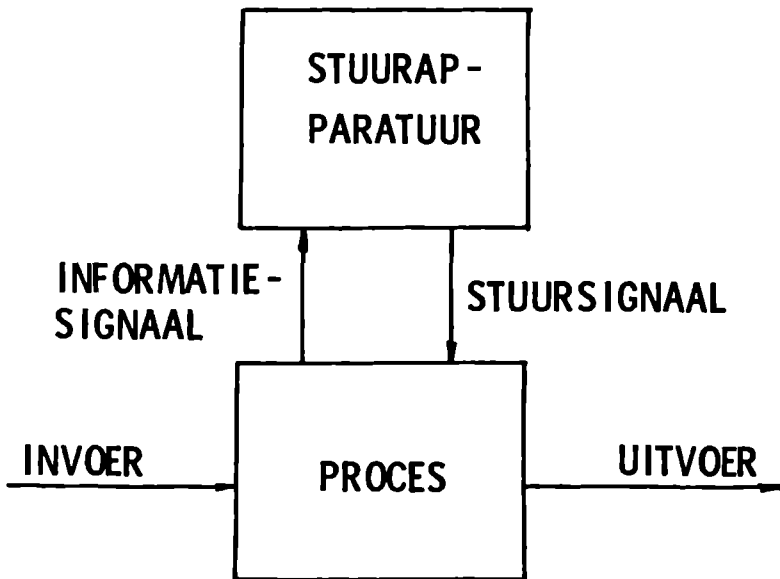


FIG. 4.1

VOORSTELLING VAN EEN AUTOMATISCH PROCES

Onder een proces kan men bijvoorbeeld verstaan een geneeskundige behandeling, die zieke mensen (invoer) transformeert tot gezonde mensen (uitvoer), of een opleiding die studenten (invoer) transformeert tot vakbekwame mensen (uitvoer).

Het kan ook een chemisch proces zijn waarin grondstoffen worden omgezet tot halffabrikaten of tot een eindprodukt.

In 't Veld (1970) geeft de volgende definitie:

"Het proces kan gedefinieerd worden als een transformatie die tijdens de doorvoer door het systeem teweeggebracht wordt, als gevolg waarvan de invoer verandert in stand, vorm, afmeting, functie of andere kenmerken."

Bij bovenstaand schema zijn we uitgegaan van een volledig geautomatiseerd proces. Omdat onze aandacht zich richt op processen waar de menselijke tussenkomst nog vereist is, is het van belang zich af te vragen waarin deze processen zullen verschillen van volledige geautomatiseerde.

Wil men een volledig automatisch proces ontwerpen dan moet men in staat zijn het volledig mathematisch te beschrijven, onder alle mogelijke omgevingscondities en interne condities. Een proces hoeft namelijk niet stationair te zijn maar kan gedurende het functioneren veranderen. We denken hierbij bijvoorbeeld aan veroudering van apparatuur en verandering van werkprocedures.

Gewoonlijk is onze kennis van processen minder volmaakt en zullen we ons tevreden moeten stellen met mathematische modellen die slechts een deel van dat proces beschrijven en dan ook nog binnen bepaalde grenzen. In zulke gevallen is men slechts in staat het proces gedeeltelijk te laten sturen d.m.v. apparatuur. Wanneer het terecht komt in een toestand die in het model niet voorzien is, of wel voorzien



maar niet oplosbaar is, zal men een beroep doen op de mens, die dan de besturingstaak overneemt.

In de vorige paragraaf hebben we gesteld dat de ontwerper het artefact zoveel mogelijk tracht te isoleren van zijn buitenomgeving, waarbij slechts rekening hoeft te worden gehouden met enkele kenmerken van de buitenomgeving. Dit betekent o.a. dat men van een proces zoveel mogelijk ingangsgrootheden zal trachten te regelen. Hoe beter het lukt een artefact te isoleren van zijn omgeving des te minder ingangsvariabelen blijven over die niet te controleren zijn. Wanneer men het proces wil isoleren kan men dit doen door het zo te ontwerpen dat men alle mogelijke ongewenste ingangsvariabelen bestuurt, of dat men zoveel mogelijk ongewenste ingangsvariabelen buitensluit. In het eerste geval legt men vooral het accent op de besturing zelf, in het tweede geval meer op de ingangsvariabelen, die men zoveel mogelijk tracht buiten te sluiten. Deze niet-gewenste ingangsvariabelen worden opgevat als storingen. Van der Grinten (1968) maakt onderscheid tussen instelbare en niet-instelbare ingangsvariabelen; waarbij hij de laatste beschouwt als storingen.

Een geautomatiseerd proces dat deels door apparatuur, deels door de mens wordt gestuurd, kan men als volgt weergeven. (Zie fig. 4.2., blz. 73)

Het schema is zowel van toepassing op een mens-machine systeem dat alleen door de mens wordt bestuurd, als op een volledig geautomatiseerd proces. In het eerste geval is het stuurapparaat overbodig, in het tweede geval de mens.

Wanneer we het schema 4.2 beschouwen als een algemene module voor een geautomatiseerd proces, hoe kunnen we dan de verschillende fasen van automatisering weergeven, uitgaande van de beginconditie mens-machine systeem?

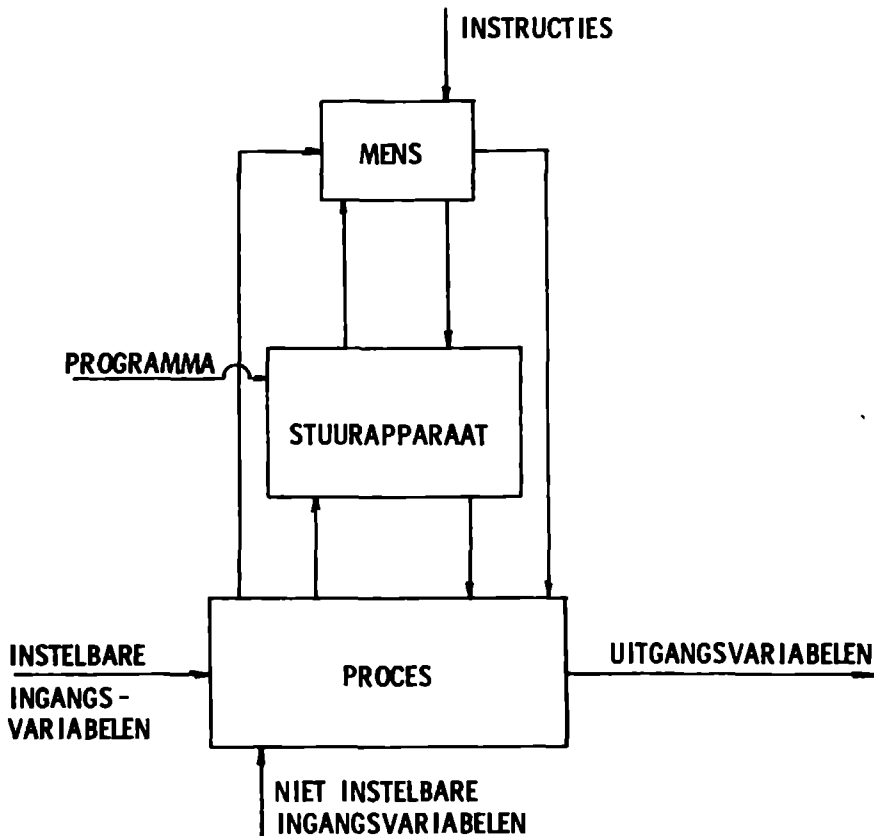


FIG. 4.2

## VOORSTELLING VAN EEN GEAUTOMATISEERD PROCES

Onder een mens-machine systeem zullen we verstaan een proces dat volledig door de mens wordt bestuurd. Hoe verandert in het algemeen de taak van de mens bij voortschrijdende automatisering en welke factoren in de buitenomgeving spelen een rol die van invloed zijn op de binnenomgeving van het artefact? In de volgende paragraaf zullen we op deze vragen nader ingaan.

#### 4.3 Ontwikkelingsgraden in de automatisering

Reeds vele duizenden jaren wordt gebruik gemaakt van werktuigen. Het hanteren er van is sterk afhankelijk van de lichaamskracht en van de vaardigheid van de mens. Tijdens de eerste industriële revolutie, toen andere vormen van energie werden aangeboord, ging de mens meer de stuurtaken uitvoeren, daarbij gebruik makend van het arbeidsvermogen van machines. Tijdens de tweede industriële revolutie heeft zich een belangrijke wijziging voorgedaan in het besturen van processen. De nieuw ontwikkelde apparatuur ging taken uitvoeren, die tot dan toe steeds als typisch menselijk waren beschouwd. Tussen mens en machine werd iets ingebouwd, dat zeker in de beginfase van deze ontwikkeling mysterieuze eigenschappen leek te hebben. Voor de operator betekende het een grote verandering, want niet alleen ging een deel van het contact met de machine verloren, waardoor de oorzaakgevolg keten zich gedeeltelijk aan zijn waarneming onttrok, ook werd zijn ingrijpen afhankelijk gemaakt van het wel of niet falen van die vreemde apparatuur.

Uit deze voorstelling van zaken zou men kunnen afleiden dat de stuurapparatuur alleen menselijke taken overnam. Dit is misleidend, want door de technologische ontwikkelingen werden taken gecreëerd die niet door de mens konden worden uitgevoerd. Van der Grinten (1968) geeft als doel van automatisering (procesregeling):

- 1 stabilisering van processen
- 2 onderdrukken van storingen
- 3 instellen en aanpassen van processen
- 4 arbeidsbesparing.

Ten aanzien van de arbeidsbesparing is hij van mening dat deze niet het eerste doel noch het resultaat van procesregeling is. Deze richt zich meer

op nieuwe taken die door de mens niet vervuld kunnen worden omdat hij ofwel te traag is, ofwel te veel foutieve beslissingen neemt als gevolg van de complexiteit van de taak. Hij is van mening dat juist de regeltechniek nieuwe processen heeft mogelijk gemaakt of heeft bijgedragen tot produkt-vermeerdering of produktveredeling.

Van der Grinten vat de eerste drie punten als volgt samen:

".....: de stabilisering richt zich op het handhaven van gemiddelde waarden op een norm (setpoint), de storingsonderdrukking streeft naar minimalisering van de afwijkingen om de gemiddelde waarde, terwijl tenslotte de optimalisering zich afvraagt of de norm wel goed was gesteld."

Met conventionele meet- en regelapparatuur is men zeer goed in staat gebleken processen te stabiliseren en storingen te onderdrukken. Door de introductie van de computer in de procesregeling kan men zich ook intensief gaan bezighouden met optimaliseren. Omdat vooral de procesrekenmachine een stuurapparaat bij uitstek is, hangt de automatiseringsgraad nauw samen met de wijze waarop dit rekentuing is ingeschakeld bij de procescontrole. Van der Grinten (1970) onderkent vier niveaus waarop de informatiestroom in een bedrijf (proces) kan worden ingedeeld. Het laagste niveau is dat van verwerving en verwerking van meetgegevens, het tweede niveau is de bewaking en stabilisering, het derde dat van de optimalisering en het hoogste niveau dat van de coördinatie in tijd en plaats.

Wat zijn de typische problemen van deze niveaus? Momenteel wordt men in organisaties overspoeld met gegevens van allerlei aard en wanneer men op dit niveau gebruik wil maken van rekenmachines moet aan twee voorwaarden worden voldaan (Van der Grinten, 1970). De gegevensstroom moet worden geredu-

ceerd tot essentiële informatie, tot kerngegevens die de beslissing mogelijk maken. Alle informatie moet benut worden om een beter inzicht in de processen te verkrijgen. Op dit niveau kunnen ergonomen met een interessant probleem geconfronteerd worden, namelijk in welke vorm moeten gegevens worden aangeboden, opdat men er zo snel en goed mogelijk van gebruik kan maken.

Op het niveau van de stabilisering kan de rekenmachine worden ingeschakeld voor een regelende taak. In de procesindustrie wordt het verwerven en verwerken van gegevens en het stabiliseren merendeels uitgevoerd door conventionele meet- en regelapparatuur. Van zeer recente datum is het inschakelen van de computer, doch deze wordt slechts in enkele gevallen gebruikt voor besturing. Volgens Van der Grinten (1970) wordt hij in 15 % van de gevallen gebruikt om gegevens zo om te werken dat de conclusies bruikbaar zijn voor besturing. Zolang men tevreden is met automatisering tot dit niveau, zal men gebruik kunnen maken van de conventionele apparatuur. Wil men echter processen gaan optimaliseren en vervolgens coördineren met andere, dan kan men er niet meer mee volstaan.

Welke veranderingen in de binnen- en buitenomgeving zullen dan van belang zijn voor het artefact, d.i. het te besturen proces, die de introductie van de computer voor procesbesturing rechtvaardigen? Wat betreft de veranderingen in de buitenomgeving, zegt Van der Grinten (1970) het volgende. Hij constateert een toenemende concurrentie, en ten gevolge van technologische vooruitgang betere meetmethoden. Wil het artefact zich aan deze veranderingen aanpassen, en in verband met zijn concurrentiepositie is het gedwongen zich aan te passen, dan zal de binnenomgeving zich moeten wijzigen. Deze wijzigingen hebben geleid tot een stijgen van de kwaliteits- en tolerantie-eisen en tot een verbeter-

ring van de stabiliteitsregelingen. Dat wil zeggen men is het proces meer onafhankelijk gaan maken van storende omgevingsvariabelen. Verder hebben volgens Van der Grinten, ontwerpers gekozen voor schaalvergroting en integratie van processen en voor het opvoeren van thermodynamische efficiëntie, daarbij ons inziens vooral lettend op de kostenbesparing. Deze laatste veranderingen hebben het artefact minder regelbaar gemaakt, dus minder onafhankelijk van zijn buitenomgeving. Tevens is daardoor het storingsniveau toegenomen. Deze twee effecten hebben tot gevolg dat het artefact minder aan zijn doel beantwoordt. Dit betekent dat de ontwerper het artefact weer wijzigt om het minder afhankelijk te doen zijn van zijn omgeving.

Men kan deze redenering ook als volgt formuleren. Het handhaven van de marktpositie in een scherpe concurrentiestrijd dwingt de ontwerpers het artefact steeds aan te passen aan de veranderende buitenomgeving en geldt als motief om steeds opnieuw de binnenomgeving te wijzigen. De volgende stap is het weer stabiel maken van het artefact. Echter doordat het artefact een meer complexe binnenomgeving heeft gekregen leidt dit tot het volgende technische probleem.

We hebben reeds aan het begin van par. 4.2 gesteld dat de informatiecapaciteit van de besturing minstens even groot moet zijn als die van het te besturen proces. Van der Grinten (1970) formuleert het als volgt:

"Een regeling zal immers in principe ongeveer dezelfde graad van complexiteit moeten bezitten als het te regelen proces."

Dit betekent dat men in de procesindustrie bij voortdurende schaalvergroting en verdergaande integratie van processen, op den duur niet meer kan volstaan met de conventionele meet- en regelapparatuur. Dit zal in veel gevallen de tussenkomst van

een procescomputer vereisen (Van der Grinten, 1970). De introductie van de computer (procesrekenmachine) maakt optimalisatie en vervolgens coördinatie mogelijk. Wanneer men eenmaal een artefact door het te stabiliseren voldoende onafhankelijk heeft gemaakt van zijn buitenomgeving kan men gaan onderzoeken of de ingestelde stabiele waarden een optimale situatie, of binnenomgeving opleveren. Dit betekent dat de stabiele regeling geoptimaliseerd wordt. Volgens Van der Grinten (1970) kan men eerst optimaliseren wanneer het doel van het proces wordt uitgedrukt in een exacte doel- of winstfunctie. Deze winstfunctie kan zelfs in eenvoudige gevallen tamelijk gecompliceerd zijn doordat operationele, technische en sociale aspecten als beperkende voorwaarden kunnen fungeren.

Simon H.A., (1969, H. 3), prefereert in deze context inplaats van optimale het begrip "bevredigend" (satisficing). Hij zegt:

"Now, no one in his right mind will satisfice if he can equally well optimize; no one will settle for good or better if he can have best. But that is not the way the problem usually poses itself in actual design situations. In the real world we usually do not have a choice between satisfactory and optimal solutions, for we rarely have a method of finding the optimum."

Hij vervolgt:

"In the case of optimization we asked: "of all possible worlds (those attainable for some admissible values of the action variables) which is the best (yields the highest value of the criterion function)?" .....

In this case, where we are seeking a satisfactory alternative, once we have found a candidate we can ask: Does this alternative satisfy all the design criteria?"

Als hoogste vorm van het verwerken van de technische informatiestroom geldt de coördinatie. Wanneer men een bedrijf als een systeem beschouwt, hoeft het optimaliseren van de subsystemen, de processen, niet te leiden tot een optimaal werkend systeem. Van der Grinten (1970) geeft als reden aan dat het praktisch onmogelijk is zulke gedetailleerde winstfuncties op te stellen dat van elke storing en van elke ingreep de konsekwenties voor elk proces en voor elk toekomstig tijdstip kunnen worden voorzien.

#### 4.4 Het mens-automaat systeem

Het belangrijkste kenmerk van automatisering is, dat apparatuur een deel van de stuurtaak van de mens heeft overgenomen. Dit betekent dat we het eerste niveau in de terminologie van Van der Grinten, niet tot de automatisering rekenen. De inschakeling van bijvoorbeeld de computer op dit niveau leidt enkel tot een reductie van gegevens, tot kerngegevens die beslissingen mogelijk moeten maken. De beslissingen zullen dus nog steeds door de mens genomen en uitgevoerd moeten worden. Eerst op het tweede niveau gaat de apparatuur een deel van de stuurtaak overnemen. (We onderkennen dus drie niveaus van automatisering: 1. de stabilisering; 2. de optimalisering; 3. de coördinatie.)

Naarmate een proces beter gestabiliseerd wordt, door meet- en regelapparatuur, of door de computer, des te minder frekvent zal de operator hoeven in te grijpen. Omdat het merendeel van de processen tot dit niveau geautomatiseerd is, zullen we het beschouwen als uitgangspunt voor een beschrijving van de taak van de operator. Van daaruit kan worden afgeleid wat de mogelijke taak van de operator zal worden op het derde en vierde niveau van gegevensverwerking, respectievelijk tweede en derde niveau van automatisering.



De graad van automatiseren is afhankelijk van de kennis die men van het proces heeft. Naarmate men een proces nauwkeuriger kan beschrijven, dat wil zeggen in mathematische termen kan formuleren, des te beter zal men het proces kunnen sturen met behulp van meet- en regelapparatuur. Echter de dynamische eigenschappen van stroommatige productieprocessen, zoals bijvoorbeeld chemische processen, zijn betrekkelijk onbekend (van Nauta-Lemke, 1967). Het gevolg is dat in het algemeen slechts in beperkte mate van meet- en regelapparatuur (stuurapparatuur) kan worden gebruik gemaakt. Datgene wat na automatiseren aan stuurtaken overblijft wordt impliciet aan de operator toegewezen. Dit betekent dat de ontwerper rekent op de waakzaamheid, inventiviteit en inzicht van de mens, daar waar men slechts beperkte kennis heeft van het proces.

Hoe kan men gegeven deze situatie de taak van de operator beschrijven in psychologische en meetbare kenmerken, terwijl hij juist in termen van de procesregeling een taak uitvoert die moeilijk en slechts vaag is te omschrijven?

Voordat we op dit probleem ingaan moeten we eerst de omstandigheden beschrijven waaronder deze taak wordt uitgevoerd. We zullen daarom schetsmatig weergeven hoe een chemische fabriek er uit ziet.

Momenteel ziet men gewoonlijk dat processen vanuit een centraal punt, de meet- en regelkamer, worden gestuurd. In deze kamer worden alle binnenkomende meetgegevens verwerkt, waarna regelsignalen naar het proces worden teruggestuurd.

De meetgegevens worden geregistreerd door middel van instrumenten die zijn ingebouwd in een bedieningspaneel. Tevens zijn in het bedieningspaneel de knoppen ingebouwd die ingrijpen van de operator mogelijk maken. Het bedieningspaneel vormt het interface tussen proces en de regelkameroperator. In deze regel-

kamer kunnen zich een of meerdere operators bevinden, terwijl deze door middel van een omroepsysteem in contact kunnen staan met veldoperators, die zich in de directe omgeving van het proces bevinden en die indien nodig ter plaatse afsluiters e.d. bijregelen of defecte onderdelen vervangen. De bezetting van de fabriek kan b.v. bestaan uit een groep van ongeveer 6 mensen. Dit betekent dat voor de beschrijving van dit complexe mens-machine systeem de relaties tussen de onderdelen van het proces, tussen de mensen onderling en tussen mensen en het proces, van belang zijn.

Hoewel we van mening zijn dat sociaal-psychologische factoren binnen de groep van operators en tussen de opeenvolgende diensten, die elkaar in een continu bedrijf afwisselen, van groot belang zijn voor het goed functioneren van de fabriek, zullen we ons toch beperken tot de taak van de operator. Onder deze operator zullen we dan degene verstaan die het proces bewaakt in de meet- en regelkamer en die, bij optredende storingen, de beslissing neemt om in te grijpen om de storing of het effect ervan op te heffen. We zijn er ons van bewust dat we ons daarmee richten op een partieel systeem. We kunnen dit als volgt motiveren. De taak van de groep van operator's is het bewaken en besturen van het proces en de communicatie tussen hen is afhankelijk van de eisen die de taak stelt. Voordat we dus iets zinvols over deze communicatie kunnen zeggen in het licht van de besturingstaak, moeten we eerst in staat zijn de interactie tussen de operator en het proces te beschrijven.

Bij de beschrijving van deze interactie zullen we uitgaan van de lay-out van het bedieningspaneel zoals men dit in bestaande fabrieken kan aantreffen. We zullen het dus slechts zijdelings hebben over de ergonomische aspecten van het paneel. Wat ons interesseert is de vraag: Is het mogelijk de taak van de operator te beschrijven uitgaande van de interactie

met het proces, via het bedieningspaneel?

Met andere woorden, bestaat er een methodiek om de taak van de operator in psychologisch meetbare grootheden te beschrijven?

Voor dat we ons in dit probleem verdiepen zullen we eerst het concept operator-bedieningspaneel-proces nauwkeuriger omschrijven.

In par. 4.3 hebben we reeds vermeld dat tengevolge van de automatisering, tussen mens en machine stuurapparatuur werd ingebouwd die een deel van de taak van de operator overnam. Voor de operator betekende dit dat de machine gedeeltelijk aan zijn invloed onttrokken werd en dat zijn ingrijpen afhankelijk werd gemaakt van de wijze van functioneren van de stuurapparatuur.

Wanneer men de relatie tussen mens en machine samenvat onder het begrip mens-machine systeem, is dit begrip dan zonder meer van toepassing op een geautomatiseerd systeem dat bestaat uit de machine of het proces, de stuurapparatuur en de mens? Met andere woorden: wat wordt verstaan onder de term mens-machine systeem?

Jordan (1968) vraagt zich af waarom deze term geïntroduceerd is. Hij zegt:

"Collections of men and machines have been with us for centuries, at least from the moment the first pulley or galley ship was invented, yet the term under discussion was coined after World War II and first appeared in print in the early 1950's. Why should the coining of a name have waited so long?"

Zijn antwoord op deze vraag is dat na de tweede wereldoorlog apparatuur ontwikkeld werd die een deel van de stuurtaak van de mens kon overnemen. Hij refereert naar een artikel van Bentley (1952) en een van Birmingham en Taylor (1954); deze artikelen behoren tot de eersten waarin sprake is van het concept mens-machine systeem. Hij vervolgt met: .

"In both examples discussed, the operator loses much of the functional control over the machine's operation - in case of the aircraft (Bentley) by default and in the case of the control system by design - and therefore finds himself controlled to a large extent by the machine."

Waarom is er in een dergelijke situatie plotseling sprake van een mens-machine conceptie en waarom wordt die machine een probleem, zodat naar een nieuwe naam voor de relatie mens en machine moet worden gezocht? Jordan (1968) geeft de volgende verklaring: Machines zijn evenals andere werktuigen middelen die de mens ten dienste staan voor het uitvoeren van een taak. Als zodanig zijn ze een uitbreiding en aanvulling van de menselijke motoriek. Het leerproces om ze te gebruiken is identiek met het proces om zich een motorische vaardigheid eigen te maken. Zodra die motorische vaardigheid zich voldoende heeft ontwikkeld, gaat ze functioneren als een automatisme. Bijvoorbeeld het besturen van een auto zal even automatisch gebeuren als lopen, schrijven en fietsen.

Jordan (op. cit.) formuleert het als volgt:

"It becomes incorporated in the body image of the operator and one attends to it as much as, for instance, one attends to one's foot in normal circumstances. Because of the experience of complete control that man has over the average machine it therefore, psychologically, loses independent causal properties when used by a trained technician."

Voor de oorlog hadden operators volledig de controle over hun machines en deze hadden binnen de context van de taak geen onafhankelijk bestaan. Zolang ze dus functioneerden zoals ze behoorden, bestond er geen enkele behoefte de machines te beschouwen als onafhankelijke dingen. Echter:

"To the extent that machines do not function properly for whatever reason, and cannot be completely controlled, the operator experiences

them as developing 'a mind of their own' and they emerge as an identifiable thing that demands attention and a name. It is not surprising therefore, that when man is given a task to do with a machine over which he has either lost some control, or is in constant danger of losing some control, the machine demands to be attended to and be recognized as an entity in its own right."

Samenvattend zouden we kunnen stellen dat we onder een mens-machine systeem verstaan een systeem dat bestaat uit minstens een mens en een machine, waarbij de machine zichzelf voor een deel stuurt, en de mens ervaart dat hij gedeeltelijk door de machine gestuurd wordt. Dit levert echter terminologische moeilijkheden omdat men in de literatuur bijvoorbeeld een mens die fietst ook definieert als een mens-machine systeem (Stassen, 1970). Hoewel dit vanuit technisch oogpunt misschien een niet relevant onderscheid is, zijn beide soorten systemen psychologisch wel verschillend. We zullen daarom vasthouden aan het concept mens-machine systeem in het algemeen, maar wanneer we te maken hebben met een proces of machine die gedeeltelijk zelfsturend is, zullen we spreken van een "mens-automaat systeem". (Dirken, 1970)

Met betrekking tot de taak van de operator in de procesindustrie kunnen we nu de volgende vraag stellen:

Bestaat er een methodiek om de taak van de operator in een mens-automaat systeem in psychologische en meetbare grootheden te beschrijven? We zullen deze vraag toepassen op de procesindustrie.

Crossman (1960) verdeelt de operatortaat in vier categorieën:

- 1. Controle

De operator moet ongewenste en onverwachte veranderingen in het proces detecteren. Omdat bij de meeste

processen meerdere min of meer onafhankelijke variabelen tegelijkertijd moeten worden gecontroleerd, moet de operator zijn aandacht gewoonlijk verdelen tussen verschillende activiteiten en in het algemeen let hij op de verschillende meterstanden waarna hij indien nodig correcties uitvoert. Dit soort taken kan zeer uiteenlopend zijn wat betreft hun moeilijkheidsgraad. De meest eenvoudige taak is het op een gewenste waarde houden van een enkele variabele door hem direct te sturen, zoals bijvoorbeeld het regelen van een afsluiter. Dit soort taken is in de psychologie uitgebreid bestudeerd en staat bekend onder de naam "volggedrag" (tracking behavior).

Aan het andere uiteinde van de schaal kan de taak van de operator bestaan uit het handhaven van een combinatie van eigenschappen van een product door middel van het afwegen van onderling conflicterende eisen. De hoeveelheid werk als gevolg van een bepaalde controletaak kan sterk variëren, en hangt hoofdzakelijk af van de graad van plotseling opduikende veranderingen in het functioneren van het proces, en wordt mede bepaald door de nauwkeurigheid waarmee moet worden bijgestuurd. In veel fabrieken doen zich van tijd tot tijd veranderingen voor in de invoer en in de eisen die men aan de uitvoer stelt. De taak van de operator is dan het proces zo snel mogelijk aan te passen aan de nieuwe eisen. Ook moet hij uitkijken naar vroege tekenen die op toekomstige moeilijkheden wijzen, zodat hij preventief kan ingrijpen. Volgens Crossman (op. cit.) kan een waakzame operator alleen al daardoor grote sommen geld besparen.

#### - 2. Speciale procedures en handelingen

Gewoonlijk zal men een aantal handelingsvoorschriften moeten uitvoeren bij het opstarten of stoppen van de fabriek, of tijdens noodtoestanden. Dit zijn vaak snelle en gecompliceerde handelingen, afgewisseld door stuuractiviteit.

- 3. Routine handelingen,  
zoals bijvoorbeeld het smeren van pompen.

#### - 4. Aantekeningen maken en rapporteren

De resultaten van bijzondere metingen worden regelmatig genoteerd, en elke storing of veranderde conditie wordt vastgelegd op het moment dat ze zich voordoet. Wanneer de gegevens-verwerking automatisch geschiedt, wordt dit aspect van de operatortaat minder belangrijk. Verbale communicatie met Collega's en de bedrijfsleiding blijft volgens Crossman belangrijk om de activiteiten in de verschillende delen van de fabriek te kunnen coördineren.

Is het mogelijk met deze vier categorieën als uitgangspunt de taak van de operator nauwkeurig te beschrijven?

Welford (1960) is van mening dat de meest duidelijke verandering in de eisen die men stelde aan werkzaamheden ten gevolge van de automatisering, een verschuiving is van de handvaardigheid naar een meer intellectuele vaardigheid. Met betrekking tot handwerktuigen betekent automatisering een vereenvoudiging van de taak. Deze vervanging van handgereedschap door machines kan echter een belangrijke verzwaring van de mentale belasting voor de operator betekenen, omdat volgens Welford de relatie tussen wat hij ziet en wat hij doet meer gecompliceerd wordt. De relatie tussen stuurhandelingen en hun effect is slechts indirect of symbolisch. Wanneer men vanuit een centrale regelkamer het proces van op afstand bedient (remote control) is deze relatie volledig symbolisch, omdat de operator het proces niet direct kan waarnemen en hij moet vertrouwen op symbolische aanduidingen of meters. Bij toenemende automatisering zal de meet- en regelapparatuur steeds meer van de operatortaat overnemen. Dit betekent dat hij steeds minder frekwent hoeft in te grijpen. Dit heeft volgens Welford (op. cit.) het volgende effect:

"The danger than is that the mental load on the operator may become too low causing boredom, and loss of attention and motivation. In the long run the operator's skill will decrease by lack of training. Thus when emergencies do occur, the

operator may have lost his skill to take appropriate actions."

Zeker tijdens noodtoestanden, gedurende welke de mentale belasting tijdelijk toeneemt, kan dit een zeer nadelig effect hebben.

Via automatisering zijn we teruggekomen op het begrip vaardigheid van de operator (operator skill). Dit begrip verwijst naar een kenmerk van handelen dat zeer wel als uitgangspunt zou kunnen dienen voor het beschrijven van de operatortaaik in psychologisch meetbare grootheden.

Wat betekent deze vaardigheid van de operator? Misschien is het beter dat men zich afvraagt: Wat tracht de operator te bereiken?

Crossman (1960) geeft op deze vraag vijf mogelijke antwoorden, afhankelijk van de soort fabriek.

Hij zegt:

- "1. Keep the process running as nearly as possible at a given condition (regulation or stabilisation).
2. Adjust the process to give the best results according to certain criteria, e.g. yield, quality, minimum of power, least lost time (optimisation).
3. Make changes from one product to another quickly and economically (changeover). (This may also be from one production capacity to another).
4. Avoid breakdowns as far as possible.
5. If a breakdown should occur, regain normal running as soon as possible, and minimize loss of material or risk of serious damage."

Wat betekent de vaardigheid van de operator naar aanleiding van deze vijf punten?

Welford (1960) merkt op:

"Although automation may lessen the need for traditional skill, the need remains for some



expertise or skill in the wider sense. This kind of skill is what Crossman indicates as 'control skill'."

Crossman (op. cit.) komt namelijk tot de volgende conclusie:

"From subjective assesment it seems clear, that individual operators do differ widely both in their speed of learning new control jobs and their final level of ability. An individual who is good on one criterion tends to be good on all."

Dit zou dus betekenen dat er een gemeenschappelijke factor ligt onder de eerste vier kenmerken. (Hij is van mening dat punt vijf: de snelheid waarmee storingen worden verholpen, er buiten valt.)

De gemeenschappelijke factor definieert Crossman als 'stuurvaardigheid' (control skill), die bijzonder is voor elke afzonderlijke controlesituatie.

Onderzoek heeft volgens Crossman (1960) uitgewezen dat deze stuurvaardigheid is opgebouwd uit vijf componenten:

- 1. Opmerken - de vaardigheid tekens en indicaties te detecteren.
- 2. Waarnemen - de vaardigheid deze tekens te interpreteren, het aflezen van instrumenten, ze met elkaar in verband brengen en er uit afleiden wat er gebeurt.
- 3. Voorspellen van wat er mogelijk gaat gebeuren in een gegeven situatie, indien men niet aan de knoppen komt.
- 4. Vertrouwdheid met de knoppen - weten welke middelen gebruikt kunnen worden om het proces te beïnvloeden, wat hun effect is, en hoe ze onderling van elkaar afhankelijk zijn.
- 5. Beslissen - de vaardigheid die stuurhandeling uit te kiezen, die onder de gegeven omstandigheden het meest waarschijnlijk tot het gewenste resultaat leidt of die ongewenste ontwikkelingen afwendt wanneer deze dreigen.

Deze indeling geeft een goed beeld van de taak van de operator. Ze is echter te algemeen van aard om in een gegeven situatie te kunnen dienen voor een gedetailleerde taakbeschrijving. Van meer recente datum is een voorstel van Crossman (1963) om de controletaak onder te verdelen in zes categorieën die kunnen dienen als elementen van de operator-taak. Deze zijn:

- "- 1. manual operations
- 2. sequences of process operations
- 3. control of process variables
- 4. detection and cure of haphazard faults
- 5. communication with colleagues
- 6. emergency drills."

Door anderen zoals bijvoorbeeld Kitchin en Graham (1961), Berliner (1964) en Verschoor (1967) zijn eveneens lijsten vervaardigd die zouden kunnen dienen als uitgangspunt voor het beschrijven van operatortaken. Wanneer men ze gebruikt zal men het operatorgedrag moeten observeren en scoren naar het aantal klassen waarin men het gedrag heeft ingedeeld. Wat levert nu een dergelijke observatiemethode op wanneer men niet tevens weet wat er in het proces gaande is, waarom de operator naar een bepaalde meter kijkt en aan een bepaalde knop draait? Zolang de veranderingen in het proces geen uitgangspunt vormen voor de beschrijving van de operatortoek, is het niet mogelijk de interactie tussen operator en proces inzichtelijk te maken. Als zodanig is de observatiemethode geen bruikbaar hulpmiddel voor het beschrijven van operatortaken.

Een methode om de taak van de operator te beschrijven in relatie met de veranderingen in het te besturen proces is door Beishon (1967) ontwikkeld, waarbij deze zich baseert op een aanpak die Crossman heeft overgenomen uit de electrotechniek, te weten analyse door middel van de signaal-stroomdiagrammen (ontwikkeld door o.a. Mason, 1953). Hij maakt een signaal-

stroomdiagram van het proces met zijn meet- en stuurpunten. De plaats van de operator in dit diagram wordt weergegeven door een blok en de interactie met het meetpaneel levert een blokdiagram. Beishon (op. cit.) geeft het als volgt weer:

"With some modifications the signal-flow graph method can be applied to systems which include human operators. The signal-flow graph represents the dynamic structure of the system and is particularly useful in two respects. First, it makes an investigator examine in considerable detail the machine part of a system. Second, the nature of the interface between man and machine can be seen more clearly."

Hij vervolgt met:

"To incorporate human operators into signal-flow graphs it has been found convenient to draw the graph so, that the operator, outlined as a box, is opposite the 'machine' part and the interface drawn as a dotted separating line. Possible or actual connections between the operator and the system variables can be indicated by broken lines to show that these are not branches of the signal-flow graph."

Om de taak van de operator te beschrijven maakt Beishon vervolgens gebruik van een handelingen-tijd diagram. Door het signaal-stroomdiagram te combineren met het handelingen-tijd diagram is de onderzoeker vervolgens in staat een lijst van controle lussen of relatief onafhankelijke controle strategieën uit te zetten, die een beschrijving geven van de operatortaaak.

Wanneer men eenmaal op dit niveau van beschrijven van de taak is gekomen, is de volgende stap die moet worden ondernomen het gedetailleerd beschrijven hoe de operator bijstuurt op basis van de informatie die af te lezen is van de meters.

Terwijl het handelingen-tijd diagram uitsluitend een beschrijving van de taak geeft zonder dat men ingaat

op het menselijk gedrag als zodanig, zal deze gedetailleerde beschrijving meer inzicht moeten verschaffen in de eigenschappen van de mens. Wanneer men daartoe in staat is zal men inzichtelijk kunnen maken hoe de informatie van de meters wordt omgezet in specifieke controle handelingen.

Abstract geformuleerd wordt het probleem dan: "Hoe verwerkt de mens continue signalen en hoe reageert hij er op?"

Dit probleem heeft sinds de tweede wereldoorlog veel aandacht gekregen en het betreffende onderzoek heeft bekendheid gekregen onder de naam "volgtaken gedrag" (tracking behavior). Wat heeft dit onderzoek opgeleverd?

#### 4.5 Mathematische modellen van de operator

In de vorige paragraaf hebben we ons in algemene zin bezig gehouden met mens-automaat systemen. De operator die een stuurtaak uitvoert is bezig instrumenten af te lezen, hun momentane waarden te vergelijken met hun gewenste waarden, en bij optredende verschillen de knoppen zo in te stellen dat het proces weer in de gewenste toestand terugkeert. De operator maakt een deel uit van een gesloten lus. Hij neemt in onze voorstelling slechts het verschil waar tussen de gewenste en feitelijke waarde van de meters, met andere woorden hij ziet enkel de fout. De wijze van bijsturen die hiermee samenhangt wordt aangeduid met de term "compensatoire volgtaak" (compensatory tracking). Deze taak is verschillend van wat genoemd wordt een "achtervolgtaak" (pursuit tracking). In deze laatste taak heeft de operator zowel informatie over het doel als over zijn stuurgedrag terwijl hij het doel volgt.

Bijvoorbeeld: wanneer men auto rijdt ziet de chauffeur zowel zijn auto als de te volgen weg.

Omdat de taak van de operator in de procesindustrie voornamelijk valt onder de noemer compensatoire volg-

taak, zullen we het in deze beschouwing enkel over dit soort volgtaken hebben. Grafisch kan men deze taak als volgt voorstellen (zie fig. 4. 3).

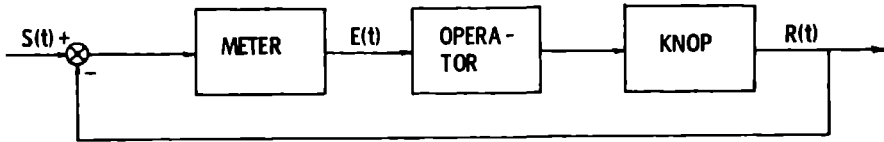


FIG. 4.3 VOORSTELLING VAN EEN COMPENSATOIRE VOLGTAAK

Dit is de meest eenvoudige voorstelling van een systeem met een gesloten lus.

In de voorgestelde situatie van fig. 4. 3. is de afwijking  $E(t)$ , die op de meter is te zien, het verschil tussen een inputsignaal  $S(t)$  en de respons  $R(t)$  van de operator. Wanneer de afwijking  $E(t)$  in de respons van de operator  $R(t)$  bekend is, is het dan mogelijk door beide onderling te vergelijken, iets te zeggen over kenmerken van dat operatorgedrag? Garner (1967) beschrijft deze situatie als volgt:

"When a human being carries out motor actions as a result of observing time-varying environments, a dynamic situation exists which is affected by the presence of the human operator. The analytical representation of this situation can take many forms depending in part on the approximation acceptable for the description, the complexity of the overall system, the analytical apparatus already in use to describe the mechanical parts of the man-machine complex. These analytical descriptions comprise the family of theories which go under the general heading of modern control theory. It is therefore reasonable to describe the human operator in the same terms in as much as he is behaving as a dynamic component,

and indeed to a certain extent is replaceable by a purely mechanical device in many cases. ... This is in keeping with the traditional approach to control systems analysis as a whole, and as pointed out earlier is a matter of accepting this degree of approximation for the description. Making this assumption it then becomes possible to utilize the very elegant tools of linear integrodifferential equations and operational transform theories."

Licklider (1960) motiveert het gebruik van lineaire modellen voor het beschrijven van het operatorgedrag als volgt:

"It is essential for designers to know about the relevant features of human behavior in terms that are compatible with those in which the characteristics of the 'hardware components' are described. These terms usually involve linear models. The theoretical importance stems from the fact that linear models are in a more advanced state of development than are nonlinear models."

In par. 2. 6.2. hebben we reeds vermeld dat bij servo-mechanismen de beslissingsregel, die aangeeft hoe de output afhangt van de input, wordt aangeduid met de naam overdrachtsfunctie.

Wanneer men de operator beschouwt als een lineair continu tijdinvariant deterministisch systeem, dan betekent dit dat men aanneemt dat zijn gedrag lineair is, dat hij continu informatie verwerkt, beslissingen neemt en reageert, dat zijn inherente eigenschappen niet veranderen met de tijd en dat er een constante relatie bestaat tussen input en output.

Onderzoek heeft aangetoond dat voor deze assumpties de volgende overdrachtsfunctie een goede benadering is van het operatorgedrag (McRuer en Krendel, 1959, Russel, 1951, en Hall, 1957).

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-ts} (1 + sT_L)}{(1 + sT_I) (1 + sT_N)} \quad (4.1)$$

$G(s)$  is de overdrachtsfunctie van de operator.  
 $K$  is de versterkingsfactor van de operator.  
 $e^{-ts}$  wordt algemeen beschouwd als de reactietijd van het CZS en deze varieert tussen .12 tot .5 sec. (Garner, 1967, Fogel, 1963).  
 $T_N$  is de neuromusculaire tijdconstante.  
 $T_L$  is de "lead time" constante.  
 $T_I$  is de "lag time" constante.

De "lead" term  $(1 + sT_L)$  betekent dat de operator meer betekenis hecht aan hoger frekwente componenten in het signaal om te kunnen anticiperen. De "lag" term  $(1 + sT_I)$  houdt in dat de operator het input-signaal afvlakt (smoothing) en het daardoor tracht aan te passen aan de reactiemogelijkheden van het gestuurde proces (Fogel, 1963).

De waarden van  $T_N$ ,  $T_I$ , en  $T_L$  en  $K$  kunnen sterk variëren wat Garner (1967) er toe brengt te concluderen dat de assumptie van een eenvoudige lineaire overdrachtsfunctie voor de operator niet erg bruikbaar is zonder data die ze kan ondersteunen.

Het blijkt echter uit onderzoek dat de menselijke waarneming discreet is, in plaats van continu, met sample tijden van .1 sec. (Stroud, 1954). Ook blijkt de respons discontinu te zijn met een reactietijd en insteltijd van ongeveer .2 sec. (Craik, 1947; Hick, 1948). Volgens Licklider (1960) is de assumptie dat de mens zich lineair en tijdinvariant gedraagt niet strikt van toepassing.

Hij zegt:

"Human beings change their modes of reaction as they pass from one situation to another. Even within a homogeneous situation, their

characteristics 'drift'. They may have thresholds - we are less sure of that now than we once were - that make them wholly insensitive to very small or very weak signals, and they certainly have overload limits that keep them from responding proportionally when the signals become very large of very intense. Human beings appear, in the fine, to respond discontinuously, and perhaps their time scales are quantized. They do not give identical responses to identical stimuli. In all these ways, they differ from purely linear systems. And, of course, what we know of the nervous system invalidates any detailed picture of the human mechanism as a network of linear components."

Hij vervolgt met:

"The deviations from linearity produced by amplitude (threshold) and time base discontinuities may be handled readily if they are fine enough. If their scale is small relative to the scale of the signal, they produce effects quite similar to weak noise."

Onder deze conditie is een lineair model bruikbaar en om de nonlineaire componenten in het operatorgedrag te vangen, tezamen met die componenten in de responsie die niet samenhangen met de input, wordt aan de lineaire component, de overdrachtsfunctie, een restfactor (remnant) toegevoegd. Het geheel wordt genoemd een kwasi-lineair model. Deze techniek is vooral door McRuer en Krendel (1959) uitgewerkt. Het operatorgedrag wordt voorgesteld door een som van twee termen. De eerste term is een lineaire differentiaal vergelijking, dat wil zeggen de best passende lineaire benadering voor de respons van de operator, wat betekent dat het gemiddelde kwadraat van de afwijking tussen model en operatorgegevens wordt geminimaliseerd. In deze beschrijving van het operatorgedrag wordt nog steeds gewerkt met constante coëfficiënten. Deze eerste term geeft onvoldoende de



respons van de operator weer, omdat hij in tegenstelling tot datgene wat is aangenomen, wel verandert onder invloed van de omgeving.

De tweede term (remnant) sluit alle elementen in die niet lineair gecorreleerd zijn met de input. McRuer en Jex (1967) motiveren dit als volgt:

"The quasi-linear system concept originally evolved from the observation that a great many nonlinear systems have responses to specific inputs which appear similar to responses of equivalent linear systems to these same inputs. For a given input-nonlinear system combination, the response of the nonlinear system can be divided into two parts-one component which corresponds to the response of an equivalent linear element driven by that input, and an additional quantity, called the 'remnant', which represents the difference between the response of the actual and the equivalent linear element. Quasi-linear models of a nonlinear system, for the specific input of interest are represented mathematically by a 'describing function', which is the equivalent linear element, plus the remnant, both of which may be input-dependent."

Gewoonlijk wordt de beschrijvende functie weergegeven in termen van frekwentie operator  $j\omega$  in plaats van de Laplace variabele  $s$  ( $= \sigma + j\omega$ ), dit om te benadrukken dat ze enkel geldig is in het frekwentie domein met continue stochastische inputs. Dit betekent dat de beschrijvende functie kan worden weergegeven door in vergelijking 4.1 de Laplace variabele  $s$  te vervangen door  $j\omega$ . Dit levert dan voor het kwasi-lineaire model de volgende vergelijking.

$$G(j\omega) = \frac{K \cdot e^{-t_j\omega} (1 + T_L j\omega)}{(1 + T_I j\omega) (1 + T_N j\omega)} + N(j\omega) = H(j\omega) + N(j\omega) \quad (4. 2)$$

Grafisch kan dit als volgt worden weergegeven (zie fig. 4. 4).

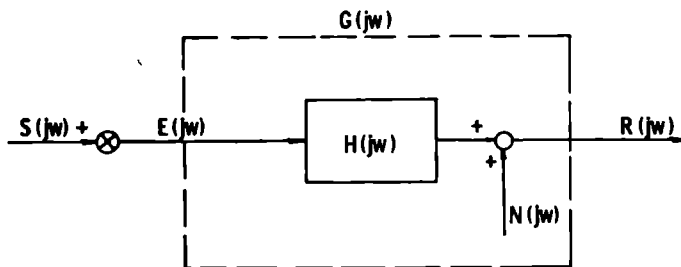


FIG. 4.4 KWASI-LINEAIR MODEL VAN EEN OPERATOR

Hoewel dit kwasi-lineaire model zeer uitgebreid met succes wordt toegepast, heeft het de volgende tekortkomingen, (Bekey, 1962):

- 1 Being linear and continuous the output of the model cannot contain frequencies not present in the input signal (such frequencies are known to exist in human operator outputs).
- 2 The model cannot account for the substantial body of experimental evidence which suggests that the human operator acts in an intermittent manner.
- 3 The model does not account for the known ability of the human operator to extrapolate his response even when the input stimulus temporarily vanishes. For example, if a target disappears momentarily a human tracker will continue to respond at nearly constant velocity."

Daarom stelt Bekey voor het kwasi-lineaire model te wijzigen. Voor de continue overdrachtsfunctie plaatst hij een poort die de inkomende signalen met discrete stappen binnenlaat (sampler). Achter deze sampler wordt dit discrete signaal door een houdcircuit ge-

reconstrueerd tot een continu signaal wat als input dient voor het kwasi-lineaire model. Grafisch ziet het er als volgt uit. (Zie fig. 4. 5).

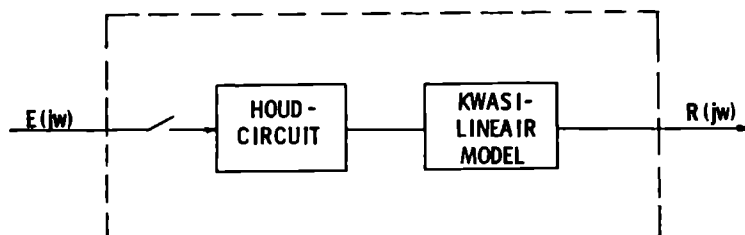


FIG. 4.5 MODEL VAN EEN OPERATOR ALS EEN SAMPLE-DATA SYSTEEM

Dit sample-data model is een logische uitbreiding van het kwasi-lineaire model en volgens Bekey blijkt dat de restfactor (remnant) kleiner is voor moeilijker taken in vergelijking met het kwasi-lineaire model. Omdat de restfactor het niet verklaarde deel is van de output van de operator, betekent dit dat het sample-data model meer kan verklaren.

De modellen die we tot nu toe besproken hebben bestaan alle uit een enkele terugkoppelingslus. Er zijn ook voorbeelden bekend van modellen die betrekking hebben op systemen met meerdere lussen. Wanneer de lussen onderling gekoppeld zijn noemen we het systeem meerlussig (multiloop), zijn ze niet gekoppeld dan heeft het systeem meerdere lussen (multiple loop).

Levison en Elkind (1967) hebben bijvoorbeeld een tweedimensionele stuurtaak onderzocht (bestaande uit twee lussen) en ze komen tot de conclusie dat een model bestaande uit een lus een goed uitgangspunt is. Ze zeggen:

"The results obtained suggest that the single-axis describing function models provide a good starting point for predicting the human con-

troller's two axis performance."

McRuer en Jex (1967) die een meerlussig (twee lussen) systeem onderzochten komen tot een overeenkomstige conclusie:

"Multiloop tasks lead to models similar to those for single loop tasks, and most of the adaptation rules seem to be equally valid."

Todosiev (1967) die een model ontwikkeld heeft voor een twee-kanalige stuurtaak met kruiskoppeling (meerlussig) komt tot eenzelfde resultaat:

"For all tasks, the uncoupled describing functions were essential identical, indicating that they were independent of the various degrees of cross-coupling in the plant dynamics."

Van recente datum zijn modellen die gebaseerd zijn op de adaptieve controle theorie, waarbij onderzocht wordt hoe de operator zich aanpast aan zijn taak en aan veranderende omstandigheden. Volgens Young (1969) staat het onderzoek naar de adaptieve besturing (adaptive manual control) nog in zijn beginfase. Hij concludeert:

"Only by pressing the development of a theory of manual adaptive control for the unlikely and unexpected failure will we keep the theory of manual control relevant to the needs of the times."

Uit dit overzicht van mathematische modellen van de operator, berustend op de lineaire meet- en regeltheorie, blijkt dat er reeds veel kennis verzameld is over zijn regelgedrag. Resultaten van dit soort onderzoek zijn voornamelijk toegepast in de luchtvaart en ruimtevaart. Wat zijn de mogelijke redenen dat deze aanpak op dermate geringe schaal is toegepast in de procesindustrie, dat de meeste kennis over het operatorgedrag afkomstig is uit observatie-onderzoek? Hoe is het mogelijk dat dit soort onderzoek, de resultaten ervan, en de manier van denken van de onderzoekers, zo weinig bekend-

heid heeft gekregen in de psychologische handboeken? In de volgende paragraaf zullen we trachten een antwoord te vinden op deze vragen.

#### 4.6 Tekortkomingen van het lineaire feedback model

Het gebruik van mathematische modellen van de operator berustend op de lineaire meet- en regeltheorie wordt vooral gemotiveerd vanuit de doelstellingen van de techniek. De ontworpen systemen moeten op de eerste plaats stabiel zijn binnen zekere grenzen. Het is daarom voor de ontwerpers van groot belang dat ze bij het ontwerpen van mens-machine systemen de mens kunnen beschrijven in termen die compatibel zijn met de kenmerken van de apparatuur. Licklider (1960) omschrijft dit als volgt:

"It is essential for designers to know about the relevant features of human behavior in terms that are compatible with those in which the characteristics of the 'hardware' components are described. These terms usually involve linear models. The theoretical importance stems from the fact that linear models are in a more advanced state of development than are nonlinear models. The concept of quasi-linearity permits, or assumes the legitimacy of, taking over much of the highly developed linear theory and using it in the study of behavior that is obviously not linear in a rigorous sense."

Dit betekent dus dat de lineaire modellen vooral worden gebruikt omdat ze goed bruikbaar zijn voor de ontwerpers.

Bekey (1970) onderkent twee elkaar overlappende soorten van vragen met betrekking tot het regelgedrag van mensen. Tot de ene soort rekent hij vragen die voortkomen uit een psychologische aanpak. Ze hebben betrekking op factoren als de moeilijkheid

van de taak, taakbelasting, vigilantie, training, leereffecten, motivatie, stress en compatibiliteit van meters en knoppen. De andere soort vragen komt voort uit de technische aanpak. Deze hebben betrekking op bijvoorbeeld het effect van 'display-gain', op de stabiliteit van een feedback systeem, de keuze van de frekwentie van het ingangssignaal, de aard van de waarschijnlijkheidsverdeling van de fout of de relatie tussen de prestatie van een menselijke regelaar en een optimale regelaar, en de stabiliteit van het mens-machine systeem. Bekey vervolgt met:

"Although the 'psychological' and 'engineering' approach in the study of manual control systems are difficult to separate, there are differences of emphasis and motivation."

Niet alleen is de psycholoog meer geïnteresseerd in andere variabelen, er is ook een meer fundamenteel verschil. Bekey vervolgt met:

".. a more fundamental difference has arisen as a result of the variety of performance measures used in evaluating the quality or state of the complete tracking system. Engineers as a result of their greater mathematical training, tend to specify the process in such a way as to permit the deduction of an appropriate measure. For example, much control system design is concerned with the use of mean-square performance criteria, since it is known that such criteria, when used as a basis of optimum design, lead to linear controllers."

Hier komt als uiteindelijk argument uit de bus dat het gebruik van het lineaire model leidt tot het gebruik van een bepaald criterium, te weten het gemiddelde kwadraat van de afwijkingen, terwijl in de psychologie gewoonlijk de 'time on target' wordt gemeten. Samenvattend kan men stellen dat het gebruik van de lineaire feedback modellen de ontwerper in staat stelt een overdrachtsfunctie te be-

palen van het regelgedrag van de operator. Dit gegeven stelt hem in staat een stabiel artefact, te weten een stabiel mens-machine systeem te ontwerpen.

Wat zegt deze overdrachtsfunctie van het menselijk gedrag en wat zijn de beperkingen van dit model? Fogel (1963) komt tot de conclusie dat het zoeken naar een mathematisch model van het stuurgedrag van de operator een gevolg was van de behoefte bij ontwerptechnici om systemen te ontwerpen die uit gesloten lussen bestaan en die o.a. voldoen aan het criterium van stabiliteit. In termen van Simon (1969) wordt de mens opgenomen in de binnenomgeving van het artefact. Men kan ook zeggen dat de mens alleen werd bestudeerd voor zover hij een schakel (link) vormde in het systeem. De resulterende mathematische uitdrukking, de overdrachtsfunctie, vertoonde termen die gemakkelijk konden worden ingebouwd in het mechanisme van de machine of van het proces. Vermoedelijk zou een dergelijk ontwerp delen van de taak van de operator kunnen overnemen en ten gevolge daarvan een efficiënter functioneren van de mens met de overblijvende taken mogelijk maken, taken die nog onbekend zijn en een deel zijn van de uiteindelijke mathematische beschrijving. Fogel zegt:

"Such a logic is deceptive. A mathematical expression of one aspect of the measured transfer characteristic cannot be taken as a partition of the human functioning. That which is accomplished by the human operator may have little, if any, correspondence with the operation indicated by the model."

Het gebruik van het lineaire feedback model van de operator steunt dus louter op technische gronden. Dit betekent dat het specifieke tekortkomingen heeft, die enerzijds te maken hebben met het feit dat de modellen beperkt van toepassing zijn en anderzijds dat het paradigma van lineariteit bepaalde belangrijke vragen over menselijk gedrag buitensluit, ten koste

van een elegant model. Hoewel dit vanuit technisch oogpunt te verdedigen is, betekent het tevens dat de doorstroming van kennis en inzicht naar de psychologie en vice versa geblokkeerd wordt. De beperkte toepasbaarheid blijkt uit het volgende (Garner, 1967):

"The quest for a satisfactory description of the human operator in dynamic terms has met with mixed succes. From the control engineer's point of view usually a very simple model suffices in order to design a complete system. However, it so often happens that because of some unexpected failure or ambiguity in an interface, or because of fatigue or boredom, some untoward runaway occurs which indicates that a vital part of the model was ignored at the outset. Further there is strong evidence that the human operator programmes himself according to his dynamic environment so that human operator models which are not adaptive are not really acceptable, unless the model is always specified in association with a particular stationary environment. Hence, it is suggested that a particular human-operator model should be proposed for each specific man-machine complex. The complete model is an ideal which we all seek, and more and more this model is likely to be described as a computer configuration or programme, rather than in purely analytical terms."

Een andere manier om de bruikbaarheid van de overdrachtsfunctie te bepalen is door de vraag te stellen welke variabelen een mens-machine systeem beïnvloeden. McRuer en Jex (1967) geven de volgende opsomming:

- 1. taakvariabelen, die betrekking hebben op de systeem input, de meters, de knoppen en het proces;
- 2. omgevingsvariabelen, bijvoorbeeld temperatuur, lawaai, klimaat, trillingen;



- 3. operator variabelen, zoals motivatie, stress, taakbelasting, opleiding, vaardigheid;
- 4. procedure variabelen, zoals instructies, volgorde van presentatie en oefening.

Het onderzoek dat voor het beschrijven van de taak van de operator gebruik maakt van de overdrachtsfunctie, is enkel gericht op taakvariabelen.

Adams, J.A., (1961) onderscheidt slechts taakvariabelen en procedure variabelen. Volgens hem zijn taakvariabelen belangrijk voor het bepalen van eisen die men aan de operator stelt. Deze sterke taakoriëntering heeft echter geleid tot het verwaarlozen van procedure variabelen die de operator beïnvloeden en als gevolg daarvan de efficiëntie van het gehele mens-machine systeem. De taakgeoriënteerde aanpak heeft een verminderde interesse tot gevolg gehad voor procedure variabelen die samenhangen met opleiding, geheugen, vermoeidheid, motivatie e.a. (Adams, op. cit.). Men is vergeten, of men heeft opzettelijk verwaarloosd, dat de ergonomie op de lange duur de mogelijkheid moet ontwikkelen de effectiviteit van een mens-machine systeem te voorspellen voor de verschillende toestanden waarin de operator zich kan bevinden. Dit betekent volgens Adams een strikt wetenschappelijke beschouwing van een breed gebied van variabelen die de mens beïnvloeden.

Terwijl de experimentele psychologie als uitgangspunt de gedragstheorie heeft gekozen als basis voor onderzoek naar het stuurgedrag, hebben veel ergonomen, met hun mechanocentrische aanpak, zich gekeerd naar de lineaire feedback-theorie als model voor het mens-machine systeem.

Adams merkt op dat het mathematische beschrijven van de karakteristieken van de mens en de machine wetenschappelijk bewonderenswaardig is. Hij vervolgt echter met te zeggen dat deze aanpak, het bepalen van de overdrachtsfunctie, van begin af aan ten dode was opgeschreven door de zware barrière van de assumptie

van lineariteit. Hij zegt dat het voor de hand ligt dat de operator een niet-lineaire component van een systeem is, die in staat is te adapteren onder invloed van leerprocessen, van vermoeidheid of veranderingen in de motivatie. Er bestaat derhalve een geringe kans voor het vinden van de algemene overdrachtsfunctie.

Birmingham en Taylor (1954) merken t.a.v. de non-lineariteit van het operatorgedrag het volgende op:

"This adaptability on the part of a man is, of course, a great boon to the control designer, since he can rely upon the human to make the most of any controlsystem, no matter how inadequate. It is this which probably constitutes the most important single reason for using men in control loops. Yet this very adjustability renders any specific mathematical expression describing human behavior in one particular control loop quite invalid for another man-machine arrangement. This suggests strongly that 'the human transfer function' is a scientific will-o'-the-wisp which can lure the control system designer into a fruitless and interminable quest."

Fitts (1951) merkt op dat in enkele grensgevallen de mens zich lineair gedraagt. In het algemeen blijkt dat de nonlineariteit van het menselijk gedrag het servomodel, en de daaruit resulterende mathematische technieken, onbruikbaar maakt als theoretisch instrument voor de gedragstheorie en als middel voor het ontwerpen van mens-machine systemen. Fitts geeft toe dat de nonlineariteiten ook in fysische systemen kunnen voorkomen, maar desondanks kunnen deze redelijk goed benaderd worden met lineaire modellen, waardoor ze van grote waarde zijn voor de fysica. Dit kan nauwelijks gezegd worden voor de psychologie waar de nonlineariteit een inherent, en tevens het meest belangrijke en meest uitdagende aspect is van de operator. Volgens Adams (1961) zijn het vooral de pro-

cedure variabelen die essentieel bijdragen tot de nonlineariteit van het operatorgedrag.

De hierboven weergegeven fundamentele kritiek op het gebruik van de lineaire meet- en regeltheorie voor het beschrijven van het operatorgedrag is vooral geconcentreerd op de beperking van het lineaire model, terwijl het operatorgedrag nonlinear is. Met andere woorden, wanneer men afstapt van het gebruik van het lineaire model en zoekt naar beschrijvingsmethoden die ook geschikt zijn voor het beschrijven van operatorgedrag dat adaptief is en nonlinear, dan is men ook in staat psychologisch meer relevant onderzoek te doen.

Zoals we in de vorige hoofdstukken ook reeds hebben opgemerkt, is de kritiek op de huidige wetenschappelijke aanpak vooral gericht op het zoeken naar analytische oplossingen. Evenals Forrester (1961) komt Bekey (1970) tot de volgende algemene conclusie:

"Nonlinear and adaptive models can be formulated but require computer simulation since general techniques for the analysis and synthesis of nonlinear systems are not available."

Samenvattend kunnen we stellen dat door een verschil van uitgangspunt de ontwerpers van mens-machine systemen, zich vooral bezig gehouden hebben met taakvariabelen, terwijl psychologen meer geïnteresseerd zijn in procedure- en operator variabelen. De scheidingslijn werd veroorzaakt door het gebruik van het lineaire feedback model voor het beschrijven van de taak van de operator. Beide groepen bestudeerden partiële systemen en door de verschillende manieren van aanpak was men niet of nauwelijks in staat de deeloplossingen te integreren tot een meer compleet beeld van de operator in een mens-machine systeem.

Dat het onderzoek m.b.t. de overdrachtsfunctie niet terug te vinden is in de psychologische handboeken is dus vooral te wijten aan het feit dat de probleem-

stelling voor psychologen weinig relevant bleek te zijn.

Eerst door het introduceren van adaptieve modellen van de operator, waarbij concepten als leren, zelf-organiserend, e.a. worden gehanteerd, wordt de doorstroming van kennis over de mens mogelijk en relevant gemaakt. Voor de ontwerper betekent dit echter een stap terug van de analytische modellen naar computer simulatie, dat wil zeggen naar numerieke oplossingen.

We hebben in par. 3.3.5. reeds opgemerkt dat de analytische methode tekort schiet als middel voor het bestuderen van complexe systemen. We hebben in dit hoofdstuk gezien wat de beperkingen zijn van de analytische methode, die het gevolg is van het gebruik van het lineaire feedback model. Als zodanig verwijst de problematiek met betrekking tot de bestudering van het mens-machine systeem naar een meer algemene problematiek die geleid heeft tot het ontstaan van de algemene systeemleer.

Hoofdstuk I hebben we afgesloten met o.a. de volgende zin:

"Uit de technische psychologie heeft zich ten gevolge van de introductie van het systeemconcept een benadering ontwikkeld die we hebben aangeduid met systeempychologie. Door het sterk benadrukken van een fysico-mathematische taal als meta-taal voor mens en machine, die de communicatie tussen psychologen en technici mogelijk maakt, zou men uit het voorgaande kunnen concluderen dat door middel van de systeemleer gepoogd wordt de psychologie te reduceren tot een soort fysica."

Zoals we in deze paragraaf gezien hebben is deze opvatting alleen van toepassing op het gebruik van het lineaire model, waarbij de onderzoeker zich alleen richt tot taakvariabelen en de mens louter beschouwt als een schakel (link) tussen meter en knop. Zodra men afstapt van de eis van lineariteit en dus van analytische oplossingen, verliest de kritiek alle

grond.

Lineariteit is namelijk een eigenschap van een model. Het is geen beperking die intrinsiek is aan de systeemleer.

Wanneer we het algemene systeemmodel gebruiken, voor het beschrijven van een mens-machine systeem, is het in principe mogelijk in dat model toestandvariabelen op te nemen die eigenschappen van de machine beschrijven en toestandvariabelen die verwijzen naar de operator, zoals bijvoorbeeld motivatie, aandacht, e.a. Voor dat we echter daartoe in staat zijn zal de psychologie zich meer moeten gaan verdiepen in het beschrijven van gedrag, zodanig dat de resultaten zijn in te passen in een model dat meerdere disciplines omvat.

#### 4.7 Konsekwenties voor de beschrijving van de taak van de operator in de procesindustrie

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat, wanneer men eenmaal is aanbeland op het niveau van het gedetailleerd beschrijven van de taak van de operator, zowel taak- als procedure, als operator- als omgevingsvariabelen van belang worden. Voor een geïntegreerde aanpak van dit probleem kan men niet volstaan met het signaal-stroomdiagram en het handelingen-tijd diagram zoals ze door Beishon (1967) worden beschreven. Deze gecombineerde methodiek is niet bedoeld voor het gedetailleerd beschrijven op welke wijze de operator de verschillende meters observeert en wat de typische kenmerken zijn van zijn wijze van ingrijpen, met andere woorden wat de kenmerkende eigenschappen zijn van zijn responsies. Zou men dit toch willen doen door toepassing van een signaal-stroomdiagram voor het operator-proces systeem dan is men gedwongen voor hem een overdrachtsfunctie of beschrijvende functie vast te stellen. Dit is nodig omdat de signaal-stroomdiagrammen van toepassing zijn op lineaire systemen.

Daarmee zijn we dan aangeland bij dezelfde problematiek als we in de vorige paragrafen hebben beschreven. Willen we een model ontwikkelen dat zowel operator als proces beschrijft, dan zal het een niet-lineair model moeten zijn. Dit betekent dat, zeker ten aanzien van de complexiteit van een operator-proces systeem, we zullen moeten werken met simulatiemodellen.

Uit het voorgaande zal ook duidelijk zijn dat een beschrijving van de operator met behulp van observatietechnieken alleen een beschrijving kan geven van de invloed van een aantal omgevings- en procedure variabelen. Zolang echter geen theorie bestaat die de geobserveerde gedragingen kan relateren aan innerlijke toestanden van de operator, dus met begrippen als taakcomplexiteit, taakbelasting, vermoeidheid, aandacht e.a., blijven de observatiemethoden zweven. Wanneer namelijk de geobserveerde gedragingen van twee operators in twee verschillende fabrieken dezelfde zijn, kan men nog geen uitspraken doen over de moeilijkheid van de taak, omdat er niet uit valt af te leiden hoe complex de decisies zijn die beide moeten nemen en welke de risico's zijn daaraan verbonden.

De taak van de operator kan momenteel slechts geïntegreerd beschreven worden met behulp van een simulatiemodel. Onderzoek van dit soort modellen moet dan aangeven welke aspecten in het operatorgedrag niet-lineair zijn en hoe de operator zich aanpast aan de omstandigheden, dat wil zeggen aan het te regelen proces. Dit soort modellen kan ook informatie geven over welke voorstelling de operator van zijn taak heeft en welke de cues zijn volgens welke hij bijstuurt. Deze empirische modellen van de operator in het te besturen proces kunnen zeer goed inzicht bieden in de veranderende taak van de operator wanneer men vertrekt vanuit een mens-machine systeem en terecht komt in het domein van het mens-

automaat systeem. Zover zijn we echter nog lang niet.

Samenvattend kunnen we stellen dat het gebruik van een simulatiemodel van een mens-machine systeem ons in staat stelt, ook de niet-lineaire aspecten van het operatorgedrag te onderzoeken. Dit betekent dat een dergelijk model ook psychologisch relevant wordt en dat het mogelijk wordt verschillende aspecten, psychologische en technische, tegelijkertijd te bestuderen in hun onderlinge afhankelijkheid.

Omdat we niet meer kunnen volstaan met een beschrijvende functie, zullen we op zoek moeten gaan naar de relevante structuur van het operator model, dat wil zeggen we zullen het verder moeten reticuleren en bij iedere volgende stap het model toetsen op zijn validiteit.

Een complex model van een proces kan dan uiteindelijk bestaan uit meerdere netwerken, die van verschillende orde kunnen zijn. Zo zullen we bijvoorbeeld kunnen onderscheiden een energienetwerk, een materiaalnetwerk, een grondstoffennetwerk, een besturingsnetwerk voor meet- en regelapparatuur en een netwerk voor de besturing door de operator(s) en een communicatienetwerk tussen de mensen die gezamenlijk het proces gaande houden. De bottle-neck voor deze vooruitgang ligt echter bij de beschrijving van de taak van de operator en zeker ten aanzien van niet-lineaire modellen staat dit onderzoek pas in zijn beginfase.

Historisch gezien is het begrijpelijk dat technici en psychologen ten aanzien van onderzoek naar mens-machine systemen naast elkaar werken zonder dat er van onderlinge beïnvloeding en overdracht van kennis veel terecht komt. Momenteel hoeft die taalbarrière en het verschil van doelstellingen geen rem meer te zijn omdat technici, die werken met adaptieve modellen van de operator ook bezig zijn "in het zwarte kastje" te duiken. Dit betekent dat de doelstellingen niet meer zo ver van elkaar verwijderd zijn.

Wil men echter komen tot een samenwerking dan zal de psycholoog naast zijn vaktaal een andere taal moeten leren spreken, die hem in staat kan stellen de mens te beschrijven in termen van zijn omgevingsvariabelen. Hij moet een taal leren spreken die hem in staat stelt de binnenomgeving van de mens te beschrijven in termen die samenhangen met zijn buitenomgeving, het geheel samengevat in een systeem. In deze terminologie is een machine of een automaat slechts een bepaald soort buitenomgeving.

We hebben in dit hoofdstuk duidelijk gemaakt dat voor de bestudering van mens-machine systemen, simulatiemodellen beter van toepassing zijn dan analytische modellen. Toch zullen we in deze modellen mensvariabelen moeten kunnen relateren aan machinevariabelen. Beide soorten variabelen kunnen worden uitgedrukt in systeemvariabelen (zie par. 2.6) en de mensvariabelen zullen in het signaal-stroomdiagram enkel terug te vinden zijn in het informatienetwerk.

In het volgende hoofdstuk zullen we een simulatiemodel ontwikkelen waarbij mens- en machinevariabelen worden uitgedrukt in de systeemvariabelen die we in hoofdstuk II hebben behandeld. Dit model is bedoeld als een aanzet voor een model van een operator-proces systeem.



## HOOFDSTUK V

### EEN SIMULATIEMODEL VAN EEN MENS-MACHINE SYSTEEM

#### 5.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we in het algemeen de problematiek geschetst van het effect van de automatisering op de taak van de operator. Een belangrijk gevolg van automatisering is dat de operator een deel van de functionele controle over de machine of over het proces verliest. Dit betekent dat hij zich in een situatie bevindt, waarin hij gedeeltelijk door de machine of door het proces wordt gestuurd. Wil men zich een inzicht verschaffen in deze problematiek dan is men zoals we hebben aange- toond vooral aangewezen op een simulatiemodel dat de menselijke handelingen beschrijft in termen die compatibel zijn met de variabelen van het te bestu- ren proces. Voordat we echter een model kunnen ma- ken van een mens-automaat systeem om het effect van automatiseren op het menselijk handelen inzicht- elijk te maken, moeten we een beschrijving hebben van een mens-machine systeem. Dit basis model dat beschrijft hoe de operator de stuurtaak uitvoert in een mens-machine systeem kan vervolgens gebruikt worden voor een mens-automaat systeem. Dit uit- gangspunt is vooral van belang omdat in een mens- automaat systeem de operator regelmatig moet in- grijpen en eventueel de besturing tijdelijk overne- men. Het mens-automaat systeem bevat dus alle ken- merken van het mens-machine systeem plus nog een aantal andere die betrekking hebben op gedeeltelij- ke automatisering en veranderde taakinhoud van de operator, die niet alleen zo nu en dan moet sturen maar ook bijvoorbeeld waakzaam moet zijn om tijdig te kunnen ingrijpen. Een model van een mens-automaat

systeem zal dus ook complexer zijn dan een mens-machine systeem. Dit zal voor een deel te wijten zijn aan het feit dat meer attributen van de operator in het model moeten worden opgenomen.

Omdat het model bedoeld is als een uitgangspunt voor een gedetailleerde beschrijving van de taak van de operator in de procesindustrie zullen we ons richten op trage processen. Dit betekent dat het effect van een storing en tevens het effect van het ingrijpen door de operator eerst na enige tijd is waar te nemen. Dit verschijnsel wordt weergegeven door middel van het begrip looptijd, dode tijd of voortplantingstijd. Van der Grinten (1968) somt enkele looptijden op; een tunneloven in een steenfabriek bijvoorbeeld heeft een looptijd van twee dagen, een roterende cementoven een looptijd van twee uren, een temperatuurreponsie van een destillatiekolom een looptijd van tien minuten, een buizenreactor met katalysator een looptijd van een minuut en een thermische kraakoven een looptijd van een seconde. Het effect van beleidsbeslissingen in een bedrijf kan nog langer op zich laten wachten, dat wil zeggen dat de responsie op een dergelijke beslissing maanden en zelfs jaren kan duren. Gewoonlijk hebben de verschijnselen die met looptijd of transporttijd worden aangeduid een exponentiële vorm, dat wil zeggen het effect van een verandering is pas na enige tijd waar te nemen, terwijl het volledige effect gradueel verschijnt.

Omdat we het model willen toetsen op zijn validiteit voordat we er eigenschappen uit willen afleiden over het operatorgedrag, zullen we bij gebrek aan empirische gegevens, een onderzoek uitvoeren dat ons gegevens moet verschaffen over de wijze waarop de operator reageert op de aangeboden stimuli. De opzet van het onderzoek is het vaststellen van de beslissingsregel die de operator hanteert. Dit houdt in dat we een proces moeten kiezen dat overeenkomst

vertoont met een mogelijk reëel proces wat betreft de traagheid waarmee veranderingen zijn waar te nemen. Tevens moet de looptijd niet dermate groot zijn dat het uitvoeren van een laboratorium onderzoek alleen daarom al grote moeilijkheden oplevert. We zullen dus moeten kiezen voor een proces met een voldoende lange looptijd, willen de resultaten enigszins bruikbaar zijn.

## 5.2 De keuze van het te besturen proces

Bij het doen van onderzoek naar het stuurgedrag van mensen moet de onderzoeker beslissen wat de input is van het systeem, welk soort meter(s) en welk soort knop(pen) hij wil gebruiken en welke de dynamische eigenschappen zijn van het te besturen proces. Poulton (1966) merkt op:

"In each case he has to make a more or less arbitrary selection from a number of possible alternatives, and his experimental results will be determined by his choice."

Voor de keuze van de dynamische eigenschappen van het proces maken we gebruik van de resultaten van onderzoek van Conklin (1957), Garvey, et. al. (1958) en Goldstein, et. al (1962). Conklin onderzocht het effect van de looptijd op de prestatie in een stuurtaak. Hij werkt met twee verschillende filters, een eerste en een tweede-orde filter (respectievelijk filter X en Y). Verder varieert hij de tijdconstanten van deze filters en gebruikt hij vijf condities 0, .25, 1, 4 en 16 sec. Als input geeft hij o.a. een sinus. Conklin komt tot de volgende conclusie:

"The results support the hypothesis that skilled behavior in a perceptual motor task depends to a large extent upon S's ability to anticipate and predict system performance .....

In a tracking task the basis for prediction arises from two sources:

a) long-term predictions founded on what S learned about the target pattern, and b) short-term predictions mediated by the perception of target rates and direction. Error information per se is of little use as an indicator of future target position."

Uit het onderzoek blijkt dat met het Y-filter (2 RC netwerken in cascade geschakeld) de stuurtaak moeilijker is dan met het X-filter (een RC netwerk). Conklin verklaart dit als volgt:

"Performance decrement is not due to S's inability to learn the pattern of target movement, such as the sine wave, but rather to the lack of immediate verification of his short-term predictions. With Filter Y, the rms ratio scores drop off more rapidly, and tracking reaches a "chance" level of proficiency at much shorter values of lag..... With straight asymptotic lag (Filter X) S is given some instantaneous information about control movements - enough initial information to verify, in part, his predictions. With Filter Y, the initial output is zero and the output does not reach a discriminable level for a fraction of a second. Lacking immediate information, predictions become uncertain and tracking performance falls off at a rapid rate as time constants are increased. Predictions, then appear to be severely limited when S cannot perceive, even in part, an immediate effect of his control movement."

De beschrijving die Conklin hier geeft vertoont veel overeenkomst met de situatie waarvoor de operator geplaatst wordt in de procesindustrie. Ter nadere verduidelijking: Conklin gebruikt het begrip "chance" om aan te duiden dat de operator in dat geval stuurt alsof hij de knop in het midden zet en er verder niets aan doet. In dat geval is de ratio tussen de rms van het signaal en van het systeem gelijk aan de waarde 1. Uit zijn onderzoek blijkt dat voor het Y-filter de waarde 1 reeds bereikt wordt wanneer het proces een tijdconstante van vier seconden heeft. Onder de tijd-

constante verstaan we die tijdsduur die het output-sigitaal nodig heeft om een waarde aan te nemen die 63 % van het inputsignaal bedraagt, wanneer dit een stapvormige input is.

Garvey, Sweeney en Birmingham (1958) onderzochten het effect van een looptijd in het "display" en in de "control" (respectievelijk de presentatie op de meters en het doorsturen van het signaal via de knop). De looptijden waren achtereenvolgens .1; .24; .45; en .74 sec.. De looptijden in het display konden onafhankelijk gevarieerd worden van de looptijden van de control.

De resultaten van dit onderzoek tonen aan dat de looptijden in het display een grotere vermindering van de prestatie tot gevolg hebben, dan de looptijden in de control.

Garvey, et. al. vonden geen significant verschil in prestatie wanneer de looptijd van de control toenam.

Goldstein en Newton (1962) onderzochten het effect van de taakcomplexiteit van een stuurtaak op de resultaten van de training. Ze bestuderen het effect van vier condities van systeem respons:

- 1 een kleine dode tijd gevolgd door een snelle responsie (SF);
- 2 een kleine dode tijd gevolgd door een langzame reactie (SS);
- 3 een lange dode tijd gevolgd door een snelle responsie (LF);
- 4 een lange dode tijd gevolgd door een langzame responsie (LS).

Ze definiëren de moeilijkheidsgraad in termen van de looptijden. Ze zeggen:

"In extreme cases, because of long delay, S may be forced to make compensatory control movements before the effects of his previous movement(s) become apparent on the display. Thus, differences in control lag may reflect differences in ease of control (task difficulty)."

Ze maken gebruik van een derde-orde proces en een sinusvormige input (.006 cps).

Ze concluderen:

"Taken together, these results show that the most difficult system to control processes features which combine both large inertial effects and slow speed of system reaction; the LS system. It is interesting to note that the coefficients reflecting these two characteristics produce the longer control lags."

In het algemeen kan men dus stellen dat systemen met een langere looptijd moeilijker te sturen zijn dan systemen met korte looptijden.

Uit de resultaten van deze onderzoeken leiden we af dat een stuurtaak vooral moeilijk wordt wanneer lange dode tijd gekoppeld wordt aan een langzame responsie. Met behulp van de gegevens van Conklin concluderen we dat een tweede-orde proces met een tijdconstante groter dan 4 sec. moeilijk te sturen is. Om in ieder geval duidelijk in het gebied werkzaam te zijn van de trage processen die moeilijk te besturen zijn hebben we voor onze proefopstelling gekozen voor een derde-orde proces met een tijdconstante van 12 sec.

Voor het simuleren van dit proces maken we gebruik van een analoge rekenmachine.

De stapresponsie van dit proces ziet er als volgt uit: (Zie fig. 5.1. op pag. 118.)

$T_c = 12 \text{ sec.}$

$T_d = 2 \text{ sec.}$

$T_c = \text{tijdconstante}$

$T_d = \text{dode tijd (latentie tijd)}$

(Uit metingen met een stopwatch bleek dat het ongeveer 2 sec. duurde voordat de wijzer begon te veranderen,  $T_d = 2 \text{ sec.}$ )

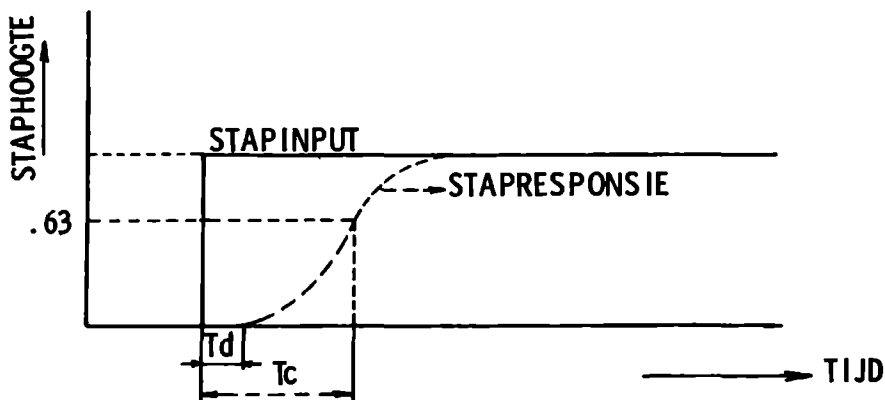


FIG. 5.1 STAPRESPONSIE VAN EEN DERDE ORDE PROCES

### 5.3 De keuze van het display, de control en de inputs

In het algemeen wordt gebruik gemaakt van compensatoire displays omdat deze in de techniek (Briggs, 1962) de voorkeur verdienen. Daarom zullen we ook een dergelijk display gebruiken.

De operator ziet bij een compensatoire stuurtaak de afwijking of fout en deze is het verschil tussen het te compenseren spoor (de input) en de respons van de operator. Het betekent dat het voor hem moeilijk is de eigenschappen van de input te leren kennen, wat tot gevolg heeft dat hij moeilijk kan voorspellen welke richting de input opgaat en hoe snel hij verandert. Dit is vooral belangrijk voor processen met een lange looptijd omdat deze een grote fase-verschuiving van het fout-sigitaal veroorzaken (Conklin, 1957). Ook is het moeilijk voor de operator te schatten wat in het fout-sigitaal de component is die het resultaat is van zijn eigen ingrijpen. Dit betekent dat hij onduidelijke feedback krijgt op zijn eigen gedrag. Wanneer een

fout wordt bijgestuurd weet hij na enige tijd niet of dit nu te wijten is aan zijn eigen ingrijpen of aan het inputsignaal. Dit bleek ook tijdens ons onderzoek het geval te zijn. Tijdens de oefenperiode werd in tegenstelling tot het eigenlijk experiment, de proefpersoon niet geïnformeerd over de aard van de input. Een weinig geoefende proefpersoon genereerde op een stap-input een sinusvormig fout-signaal dat hij vervolgens ging bijsturen. Na afloop van de betreffende trial was hij overtuigd dat de input een sinus was geweest.

Poulton (1966) omschrijft het probleem van de compensatoire stuurtaak als volgt:

"...., if the control system is complex and of high order, the man may never see the track uncomplicated by some output from the control system. He then has a single equation with two unknown variables. He can learn the control system only if he can produce in the display errors a good deal larger than those produced by the track, so that there is a perceptible correlation between his control movements and the error function."

De meter die we in ons onderzoek hebben gebruikt was een voltmeter met een lineaire schaal, lopend van -10 Volt tot +10 Volt.

Wat betreft de control hebben we gebruik gemaakt van een lineaire potentiometer die in de ene uiterste stand een spanning van +10 Volt en in de andere uiterste stand -10 Volt spanning regelde.

De wijze waarop de operator stuurt wordt aangeduid met "position-position control".

Bekey (1970) definieert dit als volgt:

"Displacement of the control handle produces a corresponding displacement of the output."

Volgens Poulton (1966) heeft het meeste onderzoek naar stuurgedrag dat door psychologen is uitgevoerd, betrekking op positionele sturing.



Display en control zijn in onze opstelling zeer compatibel. Wanneer de pp. de knop maximaal naar rechts draait, beweegt de wijzer zich, weliswaar vertraagd, naar rechts en slaat maximaal uit (+10 Volt). De knop in de linkse uiterste stand komt overeen met een maximale meter-uitslag naar links (-10 Volt). Staat de knop in de middenstand, dan staat de meter in de nulstand.

Voor ons onderzoek gebruiken we twee soorten inputs, die beiden deterministisch zijn; we gebruiken stap-inputs en sinusvormige inputs (enkelvoudige sinus-sen).

Nadat we het simulatiemodel ontwikkeld hebben voor een stuurtaak met een display en een control, zullen we het vervolgens voor het analyseren van een stuurtaak met twee gescheiden displays en controls gebruiken. Daarom krijgen alle variabelen achter hun afkorting een cijfercode die betrekking heeft op het betreffende te besturen deelproces. Bijvoorbeeld: DIST1 betekent: disturbance op deelproces 1.

(Om discussie over dit model te bevorderen, ook in andere taalgebieden, hebben we de variabelen Engelse namen gegeven.)

We hebben ons wat betreft de schrijfwijze van de vergelijkingen gehouden aan de vorm zoals deze volgens de aanpak van Forrester (1961, 1968, 1969, 1971) gebruikelijk is. Voor een goed begrip van deze schrijfwijze en de algemene structuur van deze modellen verwijzen we naar bijlage 11.

#### 5.4 Vergelijkingen voor het proces, de input(s) en het interface

We zullen de vergelijkingen uitschrijven voor het proces, de input(s) en het interface tussen het proces en de operator. Schematisch ziet dit er als volgt uit: (Zie fig. 5.2.)

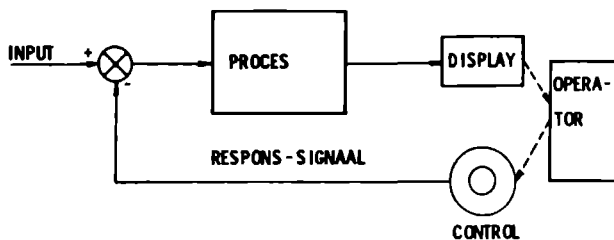


FIG. 5.2 PROCES, INTERFACE EN OPERATOR

Omdat we voor de beschrijving van het simulatiemodel gebruik maken van de aanpak zoals we deze in Hoofdstuk III hebben weergegeven is fig. 5.2. niet geschikt. We zullen het daarom zodanig wijzigen dat het aansluit bij de wijze van voorstellen van stroomdiagrammen zoals deze in bijlage 11 zijn beschreven. (Zie fig. 5.3.)

Voor de juiste formulering van de vergelijkingen verwijzen we naar de handleiding voor DYNAMO (Pugh, A.L. III, 1963). DYNAMO is een "special purpose compiler" die gebruikt wordt voor het simuleren van het soort modellen dat door Forrester c.s. is ontwikkeld.

Voor de betekenis van een aantal vergelijkingen zoals ze in DYNAMO worden geschreven zie bijlage 12.

Fig. 5.3. komt er dan als volgt uit te zien:

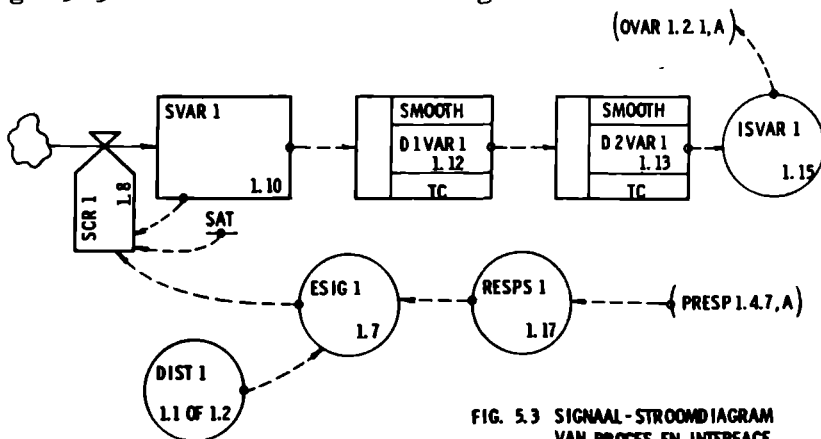


FIG. 5.3 SIGNAAL-STROOMDIAGRAM VAN PROCES EN INTERFACE

De vergelijkingen die bij deze voorstelling horen zien er als volgt uit.

De input wordt beschouwd als een verstoring (disturbance) en deze kan stapvormig zijn of een sinus. Deze ziet er als volgt uit:

DIST1.K = STEP (P1,Q1) 1.1,A  
 of  
 DIST1.K = (Q1)(SIN(6.283 \* TIME.K/P1)) 1.2,A  
 DIST1 = DISTURBANCE VAN KANAAL 1 (VOLT)

VOOR 1.1,A:  
     P1 = 9 1.3,C  
     Q1 = 0 1.4,C  
 VOOR 1.2,A:  
     P1 = 250 1.5,C  
     Q1 = 10 1.6,C

VOOR 1.1,A:  
     P1 - STAPHOOGTE {VOLT}  
     Q1 - MOMENT DAT DE STAP BEGINT {TIME}  
 VOOR 1.2,A:  
     P1 - PERIODE VAN DE SINUS {TIME}  
     Q1 - AMPLITUDE VAN DE SINUS {VOLT}

ESIG1 = DIST1.K + RESPS1.K 1.7,A  
     ESIG1 - ERRORSIGNAL 1 (VOLT)  
     RESPS1 - RESPONSE SIGNAL 1 (VOLT)

SCR1.KL = (<sup>1</sup>/SAT)(ESIG1.K - SVAR1.K) 1.8,R  
 SAT = 40 1.9,C  
     SCR1 - STATE CHANGE RATE 1 {VOLT/TIME}  
     SAT - STATE ADJUSTMENT TIME {TIME}

SVAR1.K = SVAR1.J + (DT)(SCR1.JK) 1.10,L  
     SVAR1 - STATE VARIABLE 1 {VOLT}  
     DT - SOLUTION INTERVAL {TIME}

SVAR1 = 0 1.11,N

D1VAR1.K = SMOOTH(SVAR1.K, TC) 1.12,A

D2VAR1.K = SMOOTH(D1VAR1.K, TC) 1.13,A

TC = 40 1.14,C

D1VAR1 - FIRST DELAYED VARIABLE 1 (VOLT)

D2VAR1 - SECOND DELAYED VARIABLE 1 (VOLT)

TC - TIME CONSTANT (TIME)

ISVAR1.K = TABLE(VARTAB,D2VAR1.K,-10,10,2) 1.15,A

VARTAB\* = -10/-8/-6/-4/-2/0/2/4/6/8/10 1.16,T

ISVAR1 - INDICATED STATE VARIABLE 1 (VOLT)

In vergelijking 1.15 komt tot uitdrukking dat de meter lineair is. Grafisch kan deze vergelijking als volgt worden weergegeven: (Zie fig. 5.4.A)

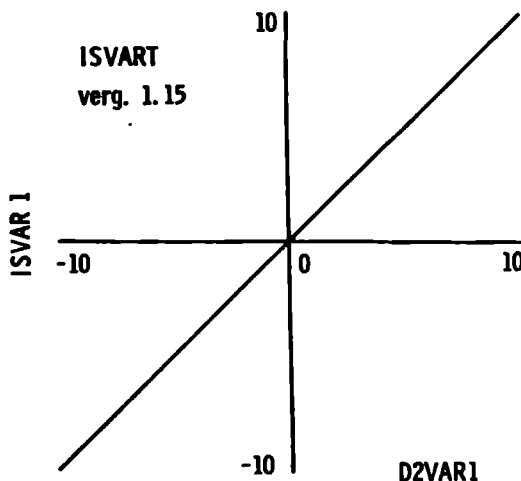


FIG. 5.4a INDICATED STATE VARIABLE 1 vs SECOND DELAYED VARIABLE 1

RESPS1.K = TABLE(RESPTAB,PRESP1.K,-10,10,2) 1.17,A

RESPTAB\* = -10/-8/-6/-4/-2/0/2/4/6/8/10 1.18,T

PRESP1 - PERCEIVED RESPONSE 1 (SCALE UNITS)

Omdat we een tijdseenheid hebben aangenomen van .1 sec.,

die we gelijk gesteld hebben aan 1, betekent een tijdconstante van 40 in werkelijkheid 4 seconden. De variabelen SVAR1, D1VAR1 en D2VAR1 zijn achtereenvolgens de toestandvariabelen van het derde-orde proces, elk met een tijdconstante van 4 seconden. Datgene wat op de meter wordt aangeduid (ISVAR1) is een lineaire transformatie van het ingangssignaal naar de meter. Respons-signaal en de input (resp. RESPS1 en DIST1) vormen samen het error-signaal dat het proces binnenkomt.

Het respons-signaal (RESPS1) is een lineaire transformatie van de hoek-verdraaiing van de knop, die door de operator bediend wordt. (Zie fig. 5.4.B) De symbolen ISVART en RESPST in de figuren 5.4.A en 5.4.B verwijzen naar de Table function van de variabelen ISVAR en RESPS.

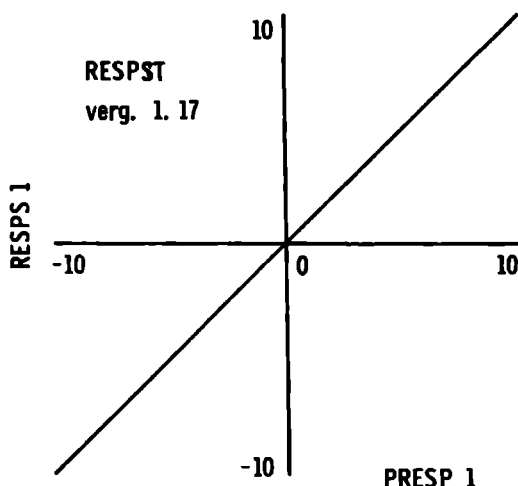


FIG. 5. 4b PERCEIVED RESPONSE vs RESPONSE SIGNAL 1

## 5.5 De operator

Een mens-machine systeem bestaat uit twee objecten, de mens en de machine.

Aan de machine hebben we twee attributen toegekend, te weten: ze is traag, d.w.z. heeft een looptijd en er is een latentie tijd alvorens een verandering is waar te nemen.

Welke attributen onderscheiden we bij de operator? Het eerste onderscheid dat gewoonlijk gemaakt wordt m.b.t. de relevante kenmerken van het operatorgedrag, heeft betrekking op functies als sensoriek (waarneming), motoriek (respons) en centrale processen (Birmingham, Taylor, 1954; Licklider, 1960; McCormick, 1970). Omdat we gebruik maken van visuele stimuli heeft waarneming alleen betrekking op visuele waarneming in ons onderzoek. De receptor, het oog, neemt veranderingen waar in zijn omgeving, de meter, en deze waargenomen veranderingen zijn de stimuli waar de mens op reageert. De effectors, d.w.z. de spieren en klieren, zorgen er voor dat reacties op de omgeving mogelijk worden (Birmingham, Taylor, 1954).

In deze terminologie is de mens het subsysteem terwijl de input wordt bepaald door de meter, en de output door de knop.

Dit onderscheid in waarneming, motoriek en centrale processen is te vaag en te globaal om te kunnen dienen voor een nauwkeurige beschrijving, die bruikbaar is voor het simulatiemodel. We zullen bij de operator dus meer eigenschappen moeten onderscheiden voor een bruikbare beschrijving van zijn gedrag. Dit betekent dat we het subsysteem operator verder moeten reticuleren.

Operators nemen gewoonlijk de waarden van procesvariabelen waar via aanwijzende of schrijvende meters.

Wanneer we bijvoorbeeld uitgaan van een lineaire meter met een wijzer die waarden kan aangeven tussen -10 en +10 met een schaalverdeling tot .2 nauwkeurig, neemt de operator deze waarden dan een-eenduidig waar? Is er een een-eenduidige afbeelding tussen meter en waarneming?

Licklider (1960) merkt op dat we tengevolge van onze ervaring een nagenoeg een-eenduidige overeenkomst hebben ontwikkeld tussen aanwijs- en reikreacties en punten in een vlak dat normaal in het gezichtsveld ligt. Omdat armen en handen bewogen worden, relatief t.o.v. hoofd en ogen, moet deze overeenkomst lineair zijn, want enkel een lineaire transformatie is invariant bij translatie en vergroting. Licklider concludeert daaruit dat onze waarneming nagenoeg lineair is. Hij formuleert dit als volgt:

"Insofar as the metric of visual space is concerned, therefore, we may say that we are working with a system that is reasonably linear in the gross."

Wanneer de operator bezig is met bijsturen volgt hij de wijzer van de meter. De oogbewegingen van de mens zijn echter niet continu, de ogen fixeren korte tijd de wijzer en wanneer deze verder draait volgen ze hem sprongsgewijze.

Dit verschijnsel wordt in de literatuur met betrekking tot sturgedrag aangeduid met de naam "intermitterend". We hebben reeds in het sample data model, dat door Bekey (1962) ontwikkeld is, gezien hoe hij met het intermitterend karakter in de menselijke waarneming rekening houdt. Licklider (1960) komt reeds eerder tot de volgende opmerking:

"Does intermittent shifting introduce a fundamental intermittency into the operator characteristic? We have to make room for that possibility in our thinking. The alternative appears to be that the nervous system pieces together the data from the retina and the data from the centers that control the eye movements, and uses the pieced-together picture as a basis for control of the tracking

response. The piecing together would appear to require considerable computation and therefore probably to introduce a time delay."

Bekey lost dit probleem op door achter de "sampler" een houdcircuit te plaatsen, waarbij een eerste-orde houdcircuit de beste resultaten oplevert.

Volgens Licklider bestaat er nog een andere mogelijke bron voor het intermitterend karakter van het visuele proces, n.l. "scanning".

Pitts en McCulloch (1947) veronderstellen dat visuele waarneming een scannen van sensorische gegevens inhoudt. Dit scannen geschiedt in een tempo dat bij benadering overeenkomt met het alfa-ritme in het E.E.G. Omdat 't intermitterend karakter van het visuele proces gewoonlijk niet wordt waargenomen, is het nodig een smoothing te postuleren die volgt op deze scanning. Zoals we reeds hebben opgemerkt past Bekey (op. cit.) deze gedachte toe door middel van een houdcircuit. Licklider vindt dat twee tweede-orde filters in cascade in het gestelde gedrag kunnen voorzien.

Samenvattend kunnen we stellen dat we de waarneming beschouwen als een lineaire transformatie van datgene wat in het gezichtsveld is van de mens. Tevens zullen we er van uitgaan dat de perceptie intermitterend is en dat een filter of looptijd nodig is om het discontinue signaal weer continu te maken.

Wat zijn de kenmerken van een respons in een stuurtaak?

Craik (1947, 1948) opperde de suggestie dat een mens die een stuurtaak uitvoert zich gedraagt als een intermitterende ballistische servo. Dat houdt in dat een eenmaal ingezette respons moet worden gecompeteerd alvorens een nieuwe correctie kan worden uitgevoerd. Volgens Poulton (1966) zijn er voldoende argumenten aanwezig die deze opvatting ondersteunen.



Het duurt minimaal .2 sec. voordat een mens reageert op een visuele stimulus waarop hij zit te wachten. De reactie op een correctie van een beweging heeft ook enige tijd nodig. Hick (1949) heeft aangetoond dat wanneer een proefpersoon half en half verwacht dat hij een willekeurige correctie moet maken, en wanneer het signaal, dat aangeeft dat een correctie moet worden uitgevoerd, verschijnt op het moment dat hij zijn initiële beweging begint, dan heeft de correctie een reactietijd van .3 seconden. De totale reactietijd van een respons bedraagt dus .5 sec.. Ze bestaat uit een dode tijd of latentie tijd van .2 sec. en .3 sec. voor de willekeurige uitgevoerde correctie. De .5 sec. is de minimale tijd die nodig is voor het begin van de corrigerende beweging.

Vince (1948) heeft aangetoond dat bij een compensatoire stuurtaak met een input met constante snelheid, de gemiddelde reactietijd schommelt rond de .5 sec. en ligt gewoonlijk tussen .25 en 1.00 sec..

Wanneer de mens een stuurtaak uitvoert zal hij steeds het handicap van zijn reactietijd moeten overwinnen. Wanneer de input een lage frekwentie heeft en middelmatig van amplitude is, is het handicap niet erg bezwaarlijk omdat de track niet ver verwijderd is van het punt waar hij enkele tienden van een seconde terug nog was. Samenvattend kunnen we stellen dat de gemiddelde reactietijd op continue stimuli .5 sec. bedraagt, terwijl de spreiding nogal groot is (.25 sec. - 1.00 sec.). Wanneer we de reactie van de operator samengesteld denken uit de attributen, waarneming, decisie en motoriek, hoe kunnen we ons deze reactietijd dan voorstellen uit de samenstelling der delen?

We hebben gezien dat de menselijke waarneming intermitterend is, tengevolge van de oogbewegingen die de mens maakt bij het volgen van het spoor, in ons geval de wijzer. Toch ervaren we dat de wijzer continu beweegt, d.w.z. het intermitterend signaal moet ver-

volgens weer continu worden gemaakt (smoothed). Deze combinatie van verschijnselen wordt door Bekey (1962) voorgesteld door achtereenvolgens een sampler en een houdcircuit in zijn model in te bouwen.

Wanneer we nu met Stroud (1954) aannemen dat de sensorische input binnenkomt in blokken van .1 sec. elk, dan kunnen we aannemen, dat om de .1 sec. een sample wordt genomen dat vervolgens dient als input voor het houdcircuit, een z.g. eerste-orde filter. Het signaal dat uit deze filter komt is continu en we zullen aannemen dat dit hetgene is wat we in feite waarnemen. Op basis van dit waargenomen signaal, neemt de operator een beslissing, die wordt omgezet in een motorische handeling. De respons wordt ook gefilterd (smoothing) en het duurt .2 sec. voordat deze compleet is (Licklider, 1960).

Het samplen en het uitvoeren van de respons nemen .3 sec. in beslag, wanneer we aannemen dat de operator .1 sec. nodig zou hebben voor het waarnemen van het effect van zijn ingrijpen, voordat de tweede cyclus van .5 sec. begint, dan blijft voor het houdcircuit en de beslissing .1 sec. over. Voor eenvoudige stuurtaken met snelle systemen is dit waarschijnlijk voldoende. Voor het trage proces waar wij ons onderzoek mee hebben uitgevoerd, met een latentie tijd van 2.0 sec., is deze voorstelling minder relevant omdat in tegenstelling tot processen met een geringe looptijd (.5 sec.) de oorzaak-gevolg keten voor de operator niet zo eenvoudig ligt. Bij een snel systeem (een systeem met een korte looptijd) ziet hij direct het resultaat van zijn ingrijpen, bij trage systemen is dit veel minder het geval. Des te trager het proces is dat de operator moet sturen, des te minder kan hij zich baseren op de momentane waarde die de wijzer aangeeft.

Poulton (1966) beschrijft dit probleem als volgt:

"Process control in a chemical or petrochemical plant can combine a high order of control with

a long time lag. This presents the man with a particularly difficult task, worse even than controlling a slow massive ship. By the time the man can see that a control movement is taking effect, it may already be too late to prevent the process from overshooting the required target even if he puts his control hard over in the opposite direction. It is therefore necessary to operate the control without any direct feedback from the plant."

Dit betekent dat voor het verwerken van de waarnemingsgegevens meer tijd nodig is voor een proces dat traag is dan voor een snel proces. Waarschijnlijk is dit de reden dat Goldstein en Newton (1962) de moeilijkheid van de taak uitdrukken in de mate van traagheid van het te besturen proces. Ze zeggen:

"One area, in which it appears possible to specify task difficulty is that of complex control systems, i.e., those systems in which one or more integrations, with corresponding time lags for these integrations, intervene between control action and system reaction. To a large extent, differences in ease of control (task difficulty) reflect both the complexity of the control dynamics involved and the length of the time phase relationship between control and display movements."

We kunnen hieruit afleiden dat de operator, en de ppn. in ons experiment meer dan .1 sec. tijd nodig zullen hebben voor het nemen van een beslissing. We zullen de beslissingstijd laten afhangen van de aard van de informatie die de operator nodig heeft om te kunnen bijsturen.

Omdat de samples een interval hebben van .1 sec., zullen we aannemen dat het houdcircuit ook een tijdconstante heeft van .1 sec..

Wat is de aard van de strategie die de operator zal kiezen wanneer hij bezig is een proces of een machine

bij te sturen?

We hebben in het vorige hoofdstuk de overdrachtsfunctie van de operator besproken (par. 4.5). In deze functie zaten de volgende termen:

- 1. Een versterkingsfactor (gain) die de amplitude van de track relateert aan de responsfunctie. Volgens Poulton (1966) is deze versterkingsfactor afhankelijk van de instructies die men de pp. heeft gegeven of van wat de pp. denkt dat hij moet doen, wanneer de instructie niet specifiek is geformuleerd.
- 2. Een reactietijd, die ligt tussen .12 en .5 sec.
- 3. Een neuromusculaire looptijd, die het gevolg is van de traagheid of inertie van de ledematen waar de respons mee wordt uitgevoerd en die ongeveer .1 sec. bedraagt.
- 4. Een eerste orde "lead" term die fungeert als een anticiperen op de weg die de track zal gaan afleggen. Licklider (1960) merkt op dat wanneer men een looptijd heeft te overwinnen, men de output o.a. afhankelijk moet maken van de eerste afgeleide van de input. Poulton (1966) merkt hierover op:  
 "The term is presumably related to the compromise strategy, which the man adopts in dealing with time lags. ... The man therefore tends to respond to what he predicts that the track will be doing next."
- 5. Een eerste orde "lag" term, waarvan wordt aangenomen dat deze vooral bijdraagt tot de stabiliteit bij lage frekquenties. Wanneer de track een lage frekquentie heeft is deze korte looptijd met een tijdconstante van ongeveer .2 sec. van weinig invloed op de grootte van de fout. Het kan zelfs zijn dat de operator nog verder achter ligt op de track, om zo in staat te zijn deze met grotere nauwkeurigheid te kunnen reproduceren (Poulton, 1966).

Licklider (1960) komt tot de conclusie dat bij een compensatoire stuurtaak waarbij het inputsignaal door filters wordt gestuurd, de operator moet anticiperen. Hij zegt n.l.:

"In those tests, the bulk of the signal power was at low frequency, but there were significant components of the signal in the higher frequency bands, also. In order to track the signal well, the operator needed to construct phase-advance networks within himself."

Volgens Licklider (1960) bleek uit Russel's onderzoek o.a. dat de operator bijstuurde op basis van de grootte of positie van de fout en de snelheid waarmee de fout veranderde. Wanneer de track slechts langzaam verandert is de operator bij benadering in staat tot integreren van het fout-sigitaal (Russel, 1951; Tustin, 1947; Elkind, 1953).

Resumerend kan men stellen dat de tot nu toe gebruikte modellen voor het beschrijven van het stuurgedrag, termen bevatten die betrekking hebben op: de geïntegreerde fout, de positionele (of proportionele) fout en de gedifferentieerde fout.

Birmingham en Taylor (1958) die 't stuurgedrag bestudeerden voor een derde-orde controle systeem besluiten tot de volgende analoge operaties die door de operator worden uitgevoerd:  $G_1e + G_2\dot{e} + G_3\ddot{e}$ . In woorden: de respons van de operator is afhankelijk van de grootte van de fout en van de eerste en tweede afgeleide van de fout. Aan elke term wordt een gewicht toegekend en het geheel wordt algebraïsch opgeteld.

Uitgaande van deze algemene bevindingen zullen we in principe stellen dat de operator een strategie hanteert die afhankelijk is van vier kenmerken van het foutensigitaal. Deze kenmerken zijn: de geïntegreerde fout (bij zeer laag frekwente tracks), de positionele fout en de snelheid en acceleratie van de fout. Aan

elke term wordt een gewicht toegekend en het geheel wordt algebraïsch opgeteld. De  $e$  in de formule die door Birmingham en Taylor wordt gebruikt is de grootte van de afwijking (error) van de wijzer. Deze  $e$  komt overeen met de error in vergelijking 2.8,A (zie par. 5.6). Wanneer we de respons van de operator (RESPS1) aanduiden met  $r(t)$  dan is de decisieregel als volgt weer te geven:

$$\begin{array}{l} \text{Deci-} \\ \text{sie-} \\ \text{regel:} \end{array} \quad r(t) = G_1 \int_0^T e_i(t) dt + G_2 e(t) + G_3 \frac{de}{dt} + G_4 \frac{d^2e}{dt^2} \quad (5.1)$$

Voor  $t = 0$  is in ons model de  $e$  gelijk aan nul. De vraag die we ons tijdens ons onderzoek hebben gesteld was: Welke termen uit de algemene vergelijking 5.1 zijn nodig voor het kunnen simuleren van het operatorgedrag?

Wanneer de input een stapfunctie is, een functie dus die na een plotselinge verandering verder constant blijft van grootte, kan men aannemen dat de operator o.a. gebruik maakt van een gemiddelde waarde van de fout over de tijd, door middel van een integratie. Is de input een sinus dan is het minder plausibel dat hij gebruik maakt van een functie die overeenkomt met mathematisch integreren. Omdat het proces traag is en de periode van de sinussen die als input dienen lang, kunnen we niet voorzien of de acceleratie van het fout-sigitaal een gegeven is dat nodig is voor het verklaren van het operatorgedrag. We zullen het daarom slechts dan introduceren wanneer blijkt dat de andere termen onvoldoende zijn voor het weergeven van de respons. Op grond van deze overwegingen zullen we stellen dat voor de stap-input de decisieregel er als volgt uitziet:

$$\begin{array}{l} \text{Decisieregel voor stap-} \\ \text{input:} \end{array} \quad G_1 \int_0^T e(t) dt + G_2 e(t) + G_3 \frac{de}{dt} \quad (5.2)$$

Voor de sinusvormige input,

decisieregels voor sinus-input:  $G_2 e(t) + G_3 \frac{de}{dt}$  (5.3)

In deze paragraaf hebben we een overzicht gegeven van de eigenschappen van de operator die we van belang achten voor het ontwikkelen van een model.

De oorspronkelijke driedeling van de attributen, waarneming, decisie en motoriek hebben we verder opgesplitst (gereticuleerd).

Van dit niveau van beschrijven zullen we uitgaan om een model van de operator te ontwikkelen.

### 5.6 Regelmodel van de operator

In de vorige paragraaf hebben we bij het waarnemingsproces een sampler en een houdcircuit onderscheiden. Het signaal-stroomdiagram ziet er als volgt uit. (Zie fig. 5.5)

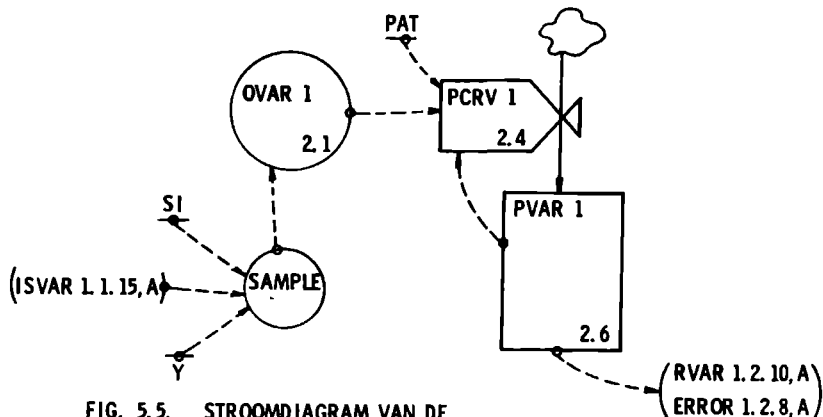


FIG. 5.5. STROOMDIAGRAM VAN DE WAARNEMING

De bij deze voorstelling horende vergelijkingen zijn als volgt:

OVAR1.K = SAMPLE (ISVAR1.K, SI, Y)	2.1, A
SI = 1 (.1 sec.)	2.2, C

Y = 0	2.3,C
OVAR1 - OBSERVED VARIABLE 1 (SCALE UNITS)	
SI - SAMPLE INTERVAL (TIME)	
Y - INITIAL VALUE OF ISVAR 1 (SCALE UNITS)	
PCRV1.KL = ( $1/PAT$ )(OVAR1.K - PVAR1.K)	2.4,R
PCRV1 - PERCEIVED CHANGE RATE VARIABLE 1(SC.UN./TIME)	
PAT - PERCEPTION ADJUSTMENT TIME (TIME)	
PVAR1 - PERCEIVED VARIABLE 1 (SCALE UNITS)	
PAT = 1 (.1 sec.)	2.5,C
PVAR1.K = PVAR1.J + (DT)(PCRV1.JK)	2.6,L
PVAR1 = 0	2.7,N

In woorden betekent dit, dat de geobserveerde waarde van de meter gelijk is aan de aangeduide waarde over uniform verdeelde tijdintervallen SI.

De geobserveerde waarde blijft gedurende het sample interval constant van grootte. De waargenomen waarde van de variabele OVAR1 is de accumulatie van datgene wat geobserveerd wordt minus wat reeds is waargenomen. Wanneer bijvoorbeeld de wijzer enige tijd een constante waarde aanneemt, zal de waargenomen waarde na korte tijd dezelfde zijn als de aangeduide.

Uit 't signaal-stroomdiagram van fig. 5.5 volgt dat de waargenomen waarde van de variabele (PVAR1) een toestandvariabele is. De waargenomen waarde van PVAR1 is de uitgangsvariabele voor het vaststellen van de beslissingsregel of strategie. Omdat de operator zal proberen de meter op de middenwaarde of nulwaarde te houden, zullen we deze waarde beschouwen als het doel of de gewenste waarde (DESIRED VALUE; DESVAL1). De proportionele fout wordt dan:

ERROR1.K = DESVAL1 - PVAR1.K	2.8,A
ERROR - (SCALE UNITS)	



DESVAL1 = 0 2.9,C  
 DESVAL1 - DESIRED VALUE VARIABLE 1  
 (SCALE UNITS)

De verandering van de fout wordt al volgt berekend: het error-sigitaal wordt vergeleken met het error-sigitaal enige tijd terug. Om het spoor van het error-sigitaal op een eerder tijdstip te bepalen wordt het door een smoothing filter gestuurd. We zullen aannemen dat dit spoor de waarde is van wat de operator zich herinnert van de error. De verandering van de error wordt als volgt vastgesteld:

RVAR1.K = SMOOTH(PVAR1.K, SMT) 2.10,A  
 SMT = 4 2.11,C  
 RVAR1 - REMEMBERED VARIABLE 1 (SCALE UNITS)  
 SMT - SMOOTHING TIME (TIME)

RERR1.K = DESVAL1 - RVAR1.K 2.12,A  
 RERR1 - REMEMBERED ERROR 1 (SCALE UNITS)

We hebben aangenomen dat het opslaan van de waargenomen waarde PVAR1 een proces is met een tijdconstante van .4 sec. Omdat de wijzer van de meter zowel negatieve als positieve waarden kan aannemen is het van belang te beschrijven hoe de operator deze verandering evalueert. Omdat er evenveel gewicht wordt toegekend aan een fout zowel in het negatieve als in het positieve gebied van de schaal, zal de operator onverschillig zijn wat betreft het teken van de error. Dit is alleen van belang voor de richting van de respons. Wat voor de operator wel belangrijk is, is het gegeven dat de error toeneemt of afneemt. Omdat de waargenomen verandering van de fout niet mag afhangen van het schaalgebied waar de wijzer zich in bevindt (dit kan positief of negatief zijn), zullen we ze als volgt formuleren:

CERR1.K = CLIP (E11.K, E12.K, ISVAR1.K, CRIT) 2.13,A  
 E11.K = RERR1.K - ERROR1.K 2.14,A  
 E12.K = ERROR1.K - RERR1.K 2.15,A

CRIT = 0 2.16,C  
 CERR1 - CHANGE OF ERROR (SCALE UNITS)  
 E11 - CERR IN POSITIVE SCALE DOMAIN (SCALE  
 UNITS)  
 E12 - CERR IN NEGATIVE SCALE DOMAIN (SCALE  
 UNITS)  
 CRIT - CRITERION (SCALE UNITS)

In woorden betekent vergelijking 2.13 dat de verandering van de error gelijk is aan de waarde van E11 wanneer de wijzer in het positieve gebied is van de schaal, en E12 wanneer deze zich in het negatieve schaalgebied bevindt.

De geïntegreerde fout wordt als volgt berekend, ze is de accumulatie of integratie van de error over de tijd. Dit houdt in dat ze een toestandvariabele is.

TCH1.KL = ERROR1.K 2.17,R  
 TCH1 - TRACK CHANGE 1 (SCALE UNITS)

IE1.K = IE1.J + (DT)(TCH1.JK) 2.18,L  
 IE1 - INTEGRATED ERROR 1 (SCALE UNITS \* TIME)

IE1 = 0 2.19,N

Het bijbehorend signaal-stroomdiagram is als volgt (zie fig. 5.6 op blz. 138).

Op dit punt van de ontwikkeling van het model is het belangrijk te stellen dat de specifieke probleemstelling voor ons onderzoek is, het zoeken naar die beslissingsregel van de operator, die ons in staat stelt het vertoonde gedrag na te bootsen. De bouwstenen waar we vanuit gaan zijn o.a. de variabelen die in fig. 5.6 zijn weergegeven. Omdat het zoeken naar de beslissingsregel(s) het onderwerp is van Hoofdstuk VII, zullen we dat stuk van het model nu niet behandelen. Is echter de beslissingsregel

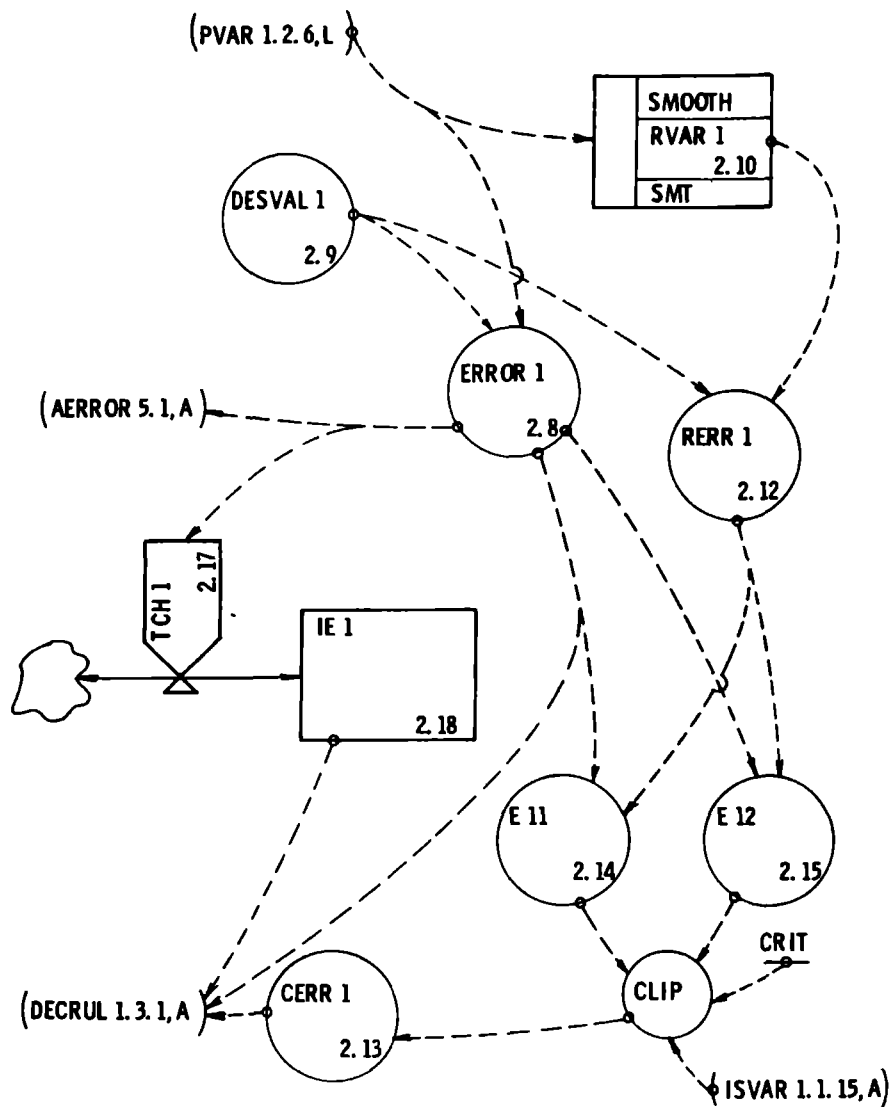


FIG. 5.6 SIGNAAL-STROOMDIAGRAM VAN GEINTEGREERDE ERROR, ERROR, EN VERANDERING VAN ERROR

(DECRUL1) bekend dan zal op elke momentane toestand van het proces door de operator de genomen beslissing worden omgezet in een respons. Dit nemen van de beslissing kost enige tijd en zal gradueel veranderen, d.w.z. de beslissing zelf doorloopt een smoothing filter. Dit ziet er als volgt uit (zie fig. 5.7).

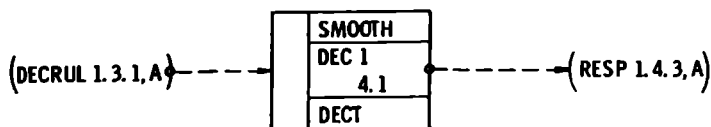


FIG. 5.7 SIGNAAL-STROOMDIAGRAM VAN HET  
UITVOEREN VAN BESLISSINGSREGEL

De vergelijking is:

$$\begin{aligned}
 \text{DEC1.K} &= \text{SMOOTH} (\text{DECRUL1.K}, \text{DECT}) && 4.1, A \\
 \text{DECT} &= 1 && 4.2, C \\
 &\text{DEC1} - \text{DECISION 1 (SCALE UNITS)} \\
 &\text{DECRUL 1} - \text{DECISION RULE 1 (SCALE UNITS)} \\
 &\text{DECT} - \text{DECISION TIME (TIME)}
 \end{aligned}$$

Voordat we de genomen beslissing kunnen koppelen aan de respons, zullen we eerst een drempel moeten inbouwen. Door de grote looptijd duurt het enige tijd voordat de pp. in staat is een verandering in de wijzerstand te detecteren. Het model van de operator begint reeds te functioneren op dermate kleine veranderingen in de meterstand dat ze onmogelijk door de operator zouden kunnen worden waargenomen. Daarom hebben we in het model een detectiedrempel ingebouwd. Deze is alleen van invloed bij de aanvang van de input, omdat, wanneer eenmaal de meterverandering is waargenomen, de operator blijft bijregelen.

Met andere woorden die drempel mag slechts eenmaal, en wel in het begin van het optreden van de input, bestaan. Omdat we het detecteren van de verandering

op de meter vaststellen door te kijken naar het moment waarop de pp. begint te reageren, tot actie overgaat, hebben we de drempel de naam actiedrempel gegeven. Omdat de actiedrempel slechts een rol speelt bij het eerste verschijnen van de afwijking, mag deze ook in het model maar een keer functioneren. Om dit te bewerkstelligen hebben we gebruik gemaakt van een z.g. pulsgenerator.

We hebben dit als volgt gesimuleerd.

AERROR1.K = MAX (ERROR1.K, - ERROR1.K) 5.1,A  
AERROR1 - ABSOLUTE VALUE ERROR 1 (SCALE UNITS)

ACTH1.K = CLIP (ACT,NOACT,AERROR1.K,CRIT1.K) 5.2,A  
ACTH1 - ACTION THRESHOLD 1 (DIMENSIONLESS)

ACT = 1 5.3,C

NOACT = 0 5.4,C

CRIT1.K = CLIP (0,.50, PULI1.K, IC1) 5.5,A  
CRIT1 - CRITERION 1 (SCALE UNITS)

IC1 = 4.1 5.6,C  
IC1 - INTENSITY CRITERION 1 (SCALE UNITS \* TIME)

PUL1.KL = (IM1.K)(AERROR1.K) 5.7,A  
PUL1 - PULSE 1 (SCALE UNITS)

PULI1.K = PULI1.J + (DT)(PUL1.JK) 5.8,L

PULI1 = 0 5.9,N  
PULI1 - PULSE INTENSITY 1 (SCALE UNITS \* TIME)

IM1.K = CLIP (0, 1, PULI1.K, IC1) 5.10,A  
IM1 - INTENSITY MULTIPLIER 1 (DIMENSIONLESS)

Het signaal-stroomdiagram ziet er als volgt uit:  
(fig. 5.8) (zie blz. 141)

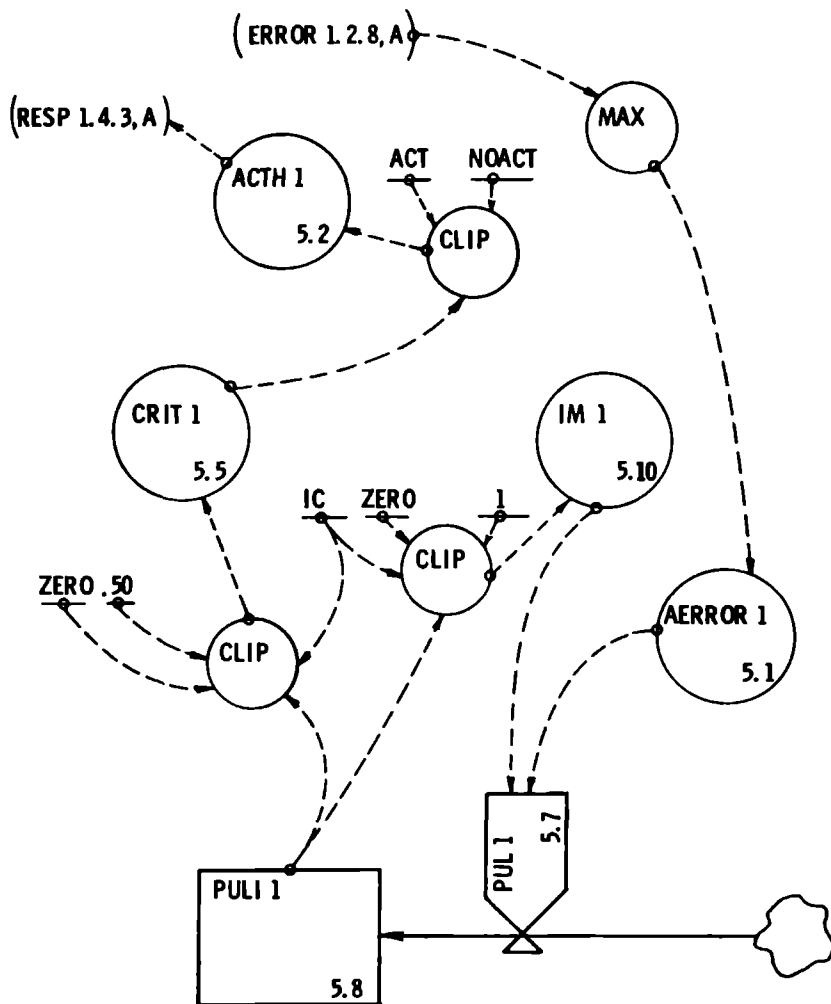


FIG. 5.8 EENMALIGE PULSGENERATOR

Het functioneren van deze eenmalige puls generator kunnen we als volgt beschrijven.

Wanneer de absolute fout een criterium (CRIT1) overschrijdt, zal de pp. een handeling uitvoeren (ACT). Dit criterium echter is afhankelijk van een zekere puls-intensiteit. Is deze pulsintensiteit groter dan een proefondervindelijk vastgestelde waarde van 3 dan zal het criterium CRIT1 gelijk worden aan nul, m.a.w. een kleine verandering in de absolute fout zal reeds tot een ingreep van de operator leiden. Zolang echter de pulsintensiteit kleiner is dan een proefondervindelijk vastgestelde waarde, zal de criteriumwaarde zo groot zijn dat het model niet zal reageren. De pulsintensiteit is in feite de geaccumuleerde absolute fout. Op het moment dat ze groter is dan  $IC1 = 3$  zal de IM1 variabele gelijk worden aan nul en zal PULI1 constant blijven van grootte, dus steeds groter dan  $IC1$ . Op dat moment heeft echter ook de criteriumwaarde (CRIT1) een waarde 'nul' gekregen en start het model met het geven van responsies, d.w.z. de actiedrempel wordt 1. Dit levert het volgende resultaat:

RESP1.K = (ACTH1.K)(DEC1.K) 4.3,A  
 RESP1 - RESPONSE 1 (SCALE UNITS)

We hebben in par. 5.3 reeds vermeld dat de respons van de operator slechts kan variëren tussen -10 en +10 Volt. Deze restrictie is als volgt geprogrammeerd:

ARESP1.K = MAX (RESP1.K, - RESP1.K) 4.4,A  
 ARESP1 - ABSOLUTE VALUE RESPONSE 1 (SCALE UNITS)

PRESP1.K = CLIP (RANGE1.K, RESP1.K, ARESP1.K,10) 4.7,A  
 PRESP1 - PERCEIVED RESPONSE (SCALE UNITS)

RANGE1.K = CLIP (10, -10, RESP1.K,0) 4.6,A  
 RANGE - SCALE RANGE OF OPERATOR OUTPUT  
 (SCALE UNITS)

```

RESPS1.K = TABLE (RESPTAB, PRES1.K, -10, 10, 2)
                                                    1.17,A
RESPTAB = -10/-8/-6/-4/-2/0/2/4/6/8/10          1.18,C
      RESPS - RESPSIGNAL INTO PROCESS (VOLT)

```

Evenals dit bij de meterindicatie het geval was, wordt bij de responsie de respons van de operator lineair getransformeerd tot een terugkoppelings-signaal dat weer door het proces wordt gestuurd. Het bijpassende signaal-stroomdiagram is als volgt (zie fig. 5.9): (zie pag. 144)



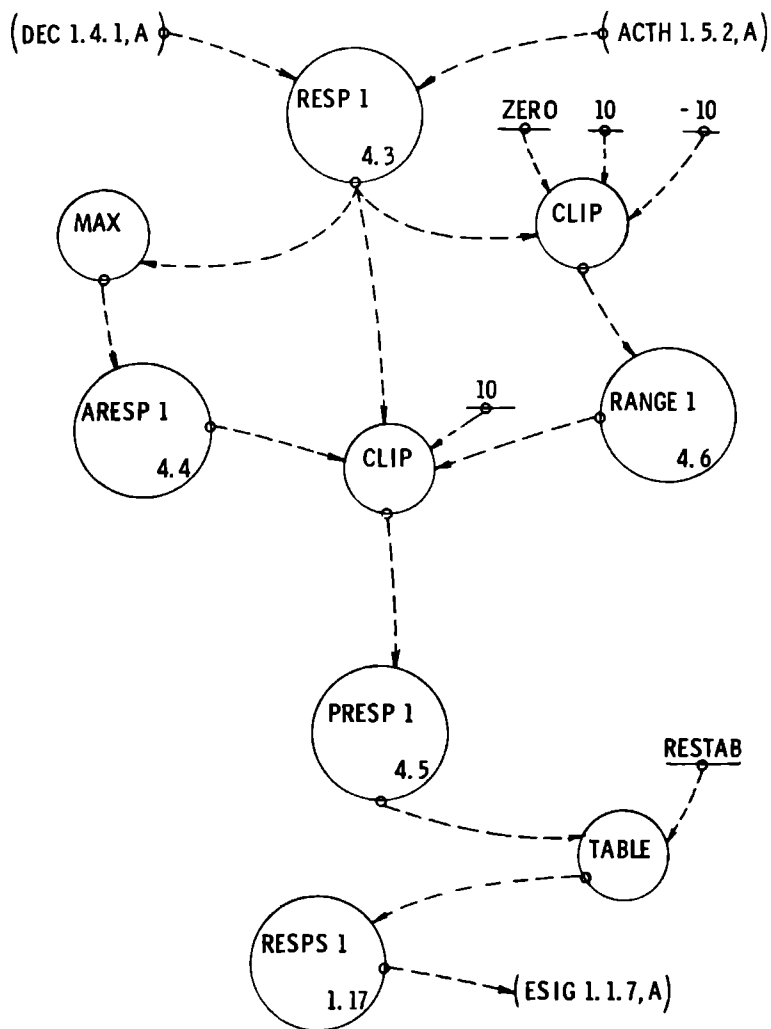


FIG. 5.9 RESPONS KARAKTERISTIEK VAN DE OPERATOR

In deze paragraaf hebben we in algemene termen het verband gelegd tussen waarneming, decisie en respons van de operator die bezig is met een stuurtaak. Daarmee hebben we de terugkoppelingslus voor operator en proces gesloten.

Omdat we ook geïnteresseerd zijn in de moeilijkheidsgraad van een stuurtaak hebben we gezocht naar een formulering voor het meten van de menselijke prestatie in termen van het operatorgedrag. We hebben de variabele die de moeilijkheidsgraad van de taak weergeeft gedefinieerd als de taak-stress.

Een autobestuurder die opmerkt dat zijn auto uit de koers raakt, zal door ingrijpen de koers trachten te herstellen. Is deze koerswijziging groot en geschiedt ze plotseling dan is de kans groot dat hij van de weg raakt. We nemen aan dat in dit laatste geval de bestuurder sneller en heftiger ingrijpt dan bij een kleine correctie van de koers. Dit geldt op overeenkomstige wijze voor de operator die een proces bijregelt. Naarmate het verder uit de hand dreigt te lopen zal hij sneller moeten beslissen en sneller bijsturen. In het algemeen geldt dat naarmate een proces verder van zijn doel afwijkt, de operator steeds meer in een situatie terecht komt die we kunnen kenmerken met "taak-stress". De taak-stress blijkt een attribuut te zijn dat in grote mate de effectiviteit van het menselijk handelen bepaalt. We beschouwen hem tevens als de variabele die direct van invloed is op de interactie tussen mens en machine. In de volgende paragraaf zullen we aangeven hoe we de taak-stress definiëren en hoe we hem in het model hebben verwerkt.

### 5.7 De taak-stress

Vooruitlopend op de analyse in Hoofdstuk VI en VII zullen we in deze paragraaf ingaan op de factoren die van invloed zijn op de respons van de operator. In par. 5.5 hebben we gesteld dat de respons een ge-

wogen som is van de proportionele fout (e) en de differentiële fout (é) voor de sinus-input en een gewogen som van deze componenten plus de geïntegreerde fout voor de stap-input.

Zoals uit tabel 6.1 (Hoofdstuk VI) blijkt is het algemene uitgangsmodel aangepast aan drie condities voor twee ppn. (T en J). Deze condities zijn de stap-input (model M20) en de sinus-input met een periode van 24 sec. (model M11) en met een periode van 36 sec. (model M12). Omdat model M12 voor pp. J het meest representatief blijkt te zijn, hebben we voor de hier te bespreken analyse wat betreft de sinus-input alleen gebruik gemaakt van model JM12 (= model M12 van pp. J).

Tijdens het aanpassen van vijf configuraties van het simulatiemodel (TM20, JM20, TM11, TM12 en JM12) aan empirische gegevens, bleek het in nagenoeg alle gevallen niet mogelijk de gewichten die worden toegekend aan de proportionele en de differentiële fout, constant te houden. Het bleek dat ze in plaats van constant, variabel zijn. Dit is af te leiden uit de vergelijkingen 3.17 t/m 3.29 van bijlage 1 en uit de overeenkomstige vergelijkingen van de bijlagen 2, 3, 4 en 5.

We hebben ons afgevraagd welke aspecten van de stuurtaak een aannemelijke verklaring zouden kunnen bieden voor de veranderlijkheid van de gewichten die worden toegekend aan de verschillende termen van het fout-sigitaal. We menen deze verklaring gevonden te hebben in een concept dat in de ergonomische literatuur veelvuldig wordt gebruikt, n.l. het begrip taak-stress.

Evenals Fitts en Posner (1967) zullen we stress niet definiëren als een conditie of situatie die ervaren wordt, maar als een specificatie van de eisen die de omgeving stelt aan de mens. Op deze manier gedefinieerd wordt stress een onafhankelijke variabele voor de operator.

In het simulatiemodel is de stress afhankelijk van de grootte van de fout en de grootte van de verandering van de fout. Dit betekent dat naarmate de operator beter in staat is de fout te reduceren, de taak-stress des te geringer zal zijn. In deze zin is de taak-stress ten gevolge van de terugkoppeling in de stuurtaak, ook een afhankelijke variabele.

Conrad (1955) onderscheidt twee soorten stress, "load stress" en "speed stress".

"Load stress" of taakbelasting varieert wanneer de aard van de taak wijzigt. Bijvoorbeeld de taakbelasting neemt toe wanneer aantal en complexiteit van stimuli, die verwerkt moeten worden, toenemen.

Kidd (1963) definieert de taakbelasting als volgt:

"By load is meant the momentary demands placed upon the operator's limited identification and associated memory capacities."

Conrad (op. cit.) omschrijft "speed stress" of tijdsdruk als:

"... This was considered to be a psychological reaction on the part of S to display conditions. It had the effect of worsening performance beyond that which might be expected from the physical characteristics of the display."

Tijdsdruk heeft in deze context betrekking op het aantal stimuli per tijdseenheid of op de tijd die per stimulus beschikbaar is.

Siegel en Wolf (1969) omschrijven stress als de ratio tussen de resterende taakelementen en de nog beschikbare tijd.

Hoe zouden we de stress kunnen beschrijven in termen van een continue stuurtaak?

Wanneer een operator een meter bijregelt zullen twee factoren van belang zijn die iets zeggen over de toestand van het te regelen proces en de mate van succes van zijn vroegere regelacties. Deze factoren

zijn de grootte van de proportionele fout en de grootte van de verandering van de fout. Is de meteruitslag groot en neemt de afwijking snel toe dan zal de operator snel en fors moeten bijsturen om het proces onder controle te kunnen houden. Voor een continue stuurtaak zou men de verandering van de fout als het equivalent kunnen beschouwen van het aantal stimuli per tijdseenheid of de tijd die per stimulus beschikbaar is in een discrete taak. Is de verandering van de fout n.l. groot dan heeft de operator weinig tijd beschikbaar en zal hij snel moeten reageren. Is de proportionele fout daarbij ook nog groot dan wordt dit effect van de tijdsdruk nog versterkt en zal hij sneller moeten reageren dan bij een kleinere proportionele fout.

Wanneer men bijvoorbeeld in een auto rijdt en men om een of andere reden van de koers afwijkt, dan zal de grootte van de afwijking en de snelheid waarmee de afwijking toeneemt van grote invloed zijn op de snelheid en de mate waarin de bestuurder moet bijsturen. We zullen in dit geval aannemen dat de taak-stress, als een combinatie van proportionele en differentiële fout, toeneemt.

Is de bestuurder in staat de wagen in een koers te brengen die evenwijdig is aan de gewenste koers dan zullen we aannemen dat de stress constant blijft ( $\Delta e = 0$ ).

Stuurt hij langzaam terug naar de gewenste koers, d.w.z. de differentiële fout is negatief en klein, dan neemt de taak-stress af. Stuurt hij echter te fel terug en schiet de auto in de andere richting over zijn koers heen, d.w.z. begint de auto te slingeren, dan neemt de taak-stress toe, hoewel de proportionele fout in eerste instantie afneemt. De grootte van de differentiële fout is echter een indicatie voor de bestuurder dat hij de wagen (voor de operator, het proces) wel of niet onder controle heeft.

De effecten van de combinatie van de proportionele en de differentiële fout accumuleren, d.w.z. de mo-

mentane taak-stress is de som van alle vroegere waarden. Dit houdt in dat de taak-stress toeneemt wanneer de koersafwijking toeneemt, maar ook wanneer de auto (of het proces) begint te slingeren rond de gewenste koers.

In voorgaande beschrijving zijn we uitgegaan van drie axioma's. Deze zijn:

- 1. De taak-stress is een functie van de error en van de verandering van error.
- 2. De taak-stress blijft constant wanneer de verandering van error gelijk is aan nul.
- 3. De taak-stress is een variabele met geheugen, d.w.z. hij is de som van alle vroegere waarden.

Op welke wijze is deze beschrijving van de taak-stress in te passen in het model?

We hebben opgemerkt dat de taak-stress een functie is van de proportionele en van de differentiële fout en dat deze constant blijft wanneer de differentiële fout nul is. Alle vroegere waarden van de proportionele en de differentiële fout dragen bij tot de momentane waarde van de stress. Dit betekent dat we de taak-stress als een toestandvariabele beschouwen. Hoe groter de vroegere waarden van de proportionele en de differentiële fout des te hoger zal de taak-stress worden. De verandering van de taak-stress komt overeen met het produkt van deze twee termen en de taak-stress is de accumulatie van al deze waarden in de tijd. De taak-stress bepaalt het gewicht dat wordt toegekend aan de proportionele en de differentiële term in de beslissingsregel van de operator. De input van het taak-stress netwerk is de momentane waarde van het produkt van de proportionele en de differentiële fout. De output of afhankelijke variabele is het gewicht dat aan de proportionele en differentiële fout wordt toegekend.

Wanneer de proportionele fout kleiner wordt en deze

afname geschiedt met een snelheid die beneden een drempelwaarde blijft, betekent het dat de operator het proces onder controle heeft. In dit geval neemt de taak-stress af.

We hebben verondersteld dat de gewichten in de vergelijking van de regelstrategie van de operator afhankelijk zijn van het produkt  $e \cdot \Delta e$  en de geaccumuleerde waarde van dit produkt ( $\int e \cdot \Delta e$ ), en we hebben ons afgevraagd of deze termen ook terug te vinden zijn in de respons. Daarom hebben we door middel van een regressie analyse onderzocht of deze termen zijn terug te vinden in de respons zoals deze door de modellen wordt gegenereerd. ( $\Delta e$  wordt gebruikt om de verandering van de error aan te geven.)

Eerst hebben we een stapsgewijze regressie analyse uitgevoerd waarbij de bijdrage van elke volgende component die in de regressievergelijking wordt geïntroduceerd wordt uitgedrukt in de percentage extra verklaarde variantie.

We zijn begonnen met een regressie analyse waarbij de respons als afhankelijke variabele wordt bepaald door de  $e$ ,  $\Delta e$  en  $\int e$  term, in deze volgorde.

Voor de verschillende configuraties van het simulatiemodel zijn de bijdragen van deze termen af te lezen in tabel 5.1.

**Tabel 5.1** Stapsgewijze regressie: bijdrage van elke volgende term in percenten verklaarde variantie.

	Term	TM20	JM20	TM11	JM12	TM12	Volgorde
1	$e$	15.5	61.3	28.6	85.8	55.9	1
2	$\Delta e$	2.8	27.5	4.4	.0	.3	2
3	$\int e$	77.1	9.2	2.6	5.8	12.7	3
		95.4	98.0	35.6	91.6	68.9	Totaal

Uit deze tabel 5.1 blijkt voor het model met de stap-input van pp. T, dat deze pp. een integrerende, proportionele en differentiële regelaar is (IPD).

Pp. J daarentegen is meer een PDI regelaar.

Ten aanzien van de snellere sinus (met een periode van 24 sec.) is pp. T (model TM11) een PDI regelaar. Voor de modellen die betrekking hebben op de langzamere sinus (met een periode van 36 sec.) zijn beide ppn. PI regelaars. De totaal verklaarde variantie is voor alle modellen significant ( $p < .0001$ ), voor model TM11 is ze echter laag in vergelijking met de andere modellen, n.l. 35.6 %.

Bij een tweede regressie analyse hebben we aan de reeds genoemde termen de voor ons doel relevante termen  $e(e.\Delta e)$ ;  $\Delta e(e.\Delta e)$ ;  $e\int e.\Delta e$ ;  $\Delta e\int e.\Delta e$  en  $e.\Delta e$  toegevoegd in deze volgorde en weer een stapsgewijze regressie uitgevoerd.

Uit tabel 5.2. is af te leiden dat behalve voor model TM11 de extra verklaarde variantie door deze termen niet groot is.

**Tabel 5.2** Stapsgewijze regressie: bijdrage van elke volgende term in percenten verklaarde variantie.

	Term	TM20	JM20	TM11	JM12	TM12	Volgorde
1	e	15.5	61.3	28.6	85.8	55.9	1
2	$\Delta e$	2.8	27.5	4.4	.0	.3	2
3	$\int e$	77.1	9.2	2.6	5.8	12.7	3
4	$e^2.\Delta e$	.0	.1	.4	.0	.0	4
5	$e.\Delta e^2$	.4	.2	13.7	1.0	.2	5
6	$e\int e.\Delta e$	.5	.2	.0	.2	.6	6
7	$\Delta e\int e.\Delta e$	1.3	.6	4.6	1.6	2.3	7
8	$e.\Delta e$	.9	.3	13.0	.4	1.4	8
		98.1	99.4	67.3	94.8	73.4	Totaal



De toename van de verklaarde variantie van model TM11 is echter 31.7 %. Dit is vooral te wijten aan de bijdrage van de termen  $\Delta e(e.\Delta e)$ ,  $\Delta e \int e.\Delta e$  en  $e.\Delta e$ . Deze termen hangen samen zoals we hebben gezien met de taak-stress ( $\int e.\Delta e$ ). Bij de andere modellen levert de term  $\Delta e \int e.\Delta e$  nog een significante bijdrage ( $p < .01$ ).

Uit de correlatiematrix van alle termen bleek echter dat de verschillende onafhankelijke variabelen met elkaar correleren. Dit betekent dat de volgorde waarin de termen staan, bepaalt hoeveel overblijft voor de volgende termen. Daarom hebben we de volgorde van die variabelen die onderling samenhang vertoonden omgekeerd. De term  $e.\Delta e$  hebben we als laatste laten staan omdat we vooral geïnteresseerd waren in de invloed van de termen  $e(e.\Delta e)$ ;  $\Delta e(e.\Delta e)$ ;  $e \int e.\Delta e$  en  $\Delta e \int e.\Delta e$  en deze alle de term  $e.\Delta e$  bevatten.

De stapsgewijze regressie toont in tabel 5.3 dat de factoren die te maken hebben met de door ons gedefinieerde taak-stress in de respons zijn terug te vinden. Dit betekent dat de wijze waarop we de taak-stress hebben gedefinieerd en beschreven van invloed is op de respons van de operator. De verschillen in de totalen van de verklaarde variantie in tabel 5.2 en 5.3 berusten op afrondingsfouten.

Voor tabel 5.3 zie pag. 153.

De regressie analyse zoals we ze hebben uitgevoerd geeft de gemiddelde bijdrage van de verschillende componenten of termen aan de respons. Deze analyse stelt ons niet in staat om te besluiten dat de respons van de operator het beste benaderd kan worden door een lineaire combinatie met constante coëfficiënten van bijvoorbeeld de termen  $e$ ,  $\Delta e$  en  $\int e$ .

**Tabel 5.3** Stapsgewijze regressie: bijdrage van elke volgende term in percenten verklaarde variantie.

	Term	TM20	JM20	TM11	JM12	TM12	Volgorde
7	$\Delta e / e \cdot \Delta e$	8.0	22.5	5.0	11.3	6.9	7
6	$e / e \cdot \Delta e$	.0	7.0	4.9	.4	10.8	6
5	$e \cdot \Delta e^2$	7.2	18.0	1.2	31.3	12.6	5
4	$e^2 \cdot \Delta e$	7.1	21.4	6.3	1.0	6.9	4
3	$\int e$	62.2	25.0	4.2	7.9	15.9	3
2	$\Delta e$	.0	.0	3.3	.0	.2	2
1	$e$	13.0	5.1	29.5	42.6	18.7	1
8	$e \cdot \Delta e$	.9	.3	13.0	.4	1.4	8
		98.4	99.3	67.4	94.9	73.4	Totaal

Wanneer we meer geïnteresseerd zijn in 'n beschrijving door middel van een model van een specifiek stuurgedrag, d.w.z. vaststellen hoe de momentane responsie afhangt van de momentane waarde van de errorterm dan is een regressie analyse niet geschikt. Deze geeft slechts het gemiddeld gedrag over de trials zoals dit afhangt van de gemiddelde waarden van de errortermen en de spreiding rond dit gemiddelde.

Voor een meer specifieke analyse zullen we gebruik maken van de beschrijving zoals deze wordt weergegeven door het simulatiemodel. Uit de vergelijkingen 3.17 t/m 3.29 van bijlage 1 en uit de overeenkomstige vergelijkingen van de bijlagen 2 t/m 5 is af te leiden dat de gewichten toe te kennen aan de proportionele en differentiële fout, niet lineair zijn en tevens verschillen voor de toenemende en afnemende fout. Door deze aspecten in te bouwen in de beslissingsstrategie van de operator, zijn we in staat gebleken de via een experiment verkregen responsies na te

bootsen.

In de regressie analyse hebben we laten zien dat we door toevoeging van een aantal produkt termen een betere benadering krijgen van het gedrag van de operator. De gekozen produkt termen komen overeen met de wijze waarop in het model de taak-stress werd gedefinieerd.

## 5.8 Lineariteit vs niet-lineariteit

In de vorige paragraaf hebben we door middel van een stapsgewijze regressie een aannemelijke verklaring trachten te geven van de factoren die van invloed zijn op de gewichten die worden toegekend aan de proportionele, de differentiële en de integrerende term in de beslissingsregel van de operator. We hebben het concept taak-stress gedefinieerd als de integraal van het produkt van de error en de afgeleide van de error ( $\int e \cdot \Delta e$ ). Zoals uit de bijlagen 1 t/m 5 blijkt, zijn de regelstrategieën van de verschillende modellen niet-lineair. Dit kan bijvoorbeeld worden afgeleid uit de niet-lineariteit van de gewichten van de proportionele en de differentiële component in de decisieregel. Uit tabel 5.1 van par. 5.7 zou men echter kunnen concluderen dat een lineaire regressie analyse een model zou kunnen opleveren dat minstens evenveel van de variantie verklaart en dat tevens eenvoudiger van structuur is. Dit lineaire model met constante coëfficiënten zou vanwege zijn eenvoud te prefereren zijn boven de meer complexe configuraties die we hebben ontwikkeld. De resultaten van de regressie analyse kunnen aanleiding geven tot deze conclusie. Aansluitend op de analyse van par. 5.7 zullen we daarom onderzoeken of een dergelijke conclusie juist is. We hebben daarom de respons van de operator voor de modellen TM20, JM20, TM11, JM12 en TM12 laten afhangen van de lineaire combinatie van de  $e$ ,  $\Delta e$  en  $\int e$  term, waarbij de regressie coëfficiënten de gewichten zijn die aan deze termen worden

toegekend. Vervolgens hebben we met deze lineaire modellen een computer run gemaakt. De gegevens van deze run stellen ons in staat de correlatie-coëfficiënten te berekenen tussen het lineaire model en een aantal empirische gegevens (trial 1 t/m 6). Deze correlatie-coëfficiënten kunnen worden vergeleken met de correlaties tussen het betreffende niet-lineaire model met dezelfde reeks empirische gegevens (zie tabel 5.4A en 5.4B).

Tabel 5.4-A Correlatie coëff. tussen modelgegevens en empirische data voor PP.T (product moment correlaties)

Trial	Step Input		Sinus Input periode = 24 sec.		Sinus Input periode = 36 sec.	
	Lin. model	Nonlin. model M20	Lin. model	Nonlin. model M11	Lin. model	Nonlin. model M12
	respons		respons		respons	
1	.93	.93	.26	.80		
2	.92	.95	.16	.76		
3	.57	.51	.14	.47	.48	.59
4	.67	.66	.20	.51	.45	.80
5	.38	.33	.02	.66	.41	.77
6	.62	.56	.29	.29	.57	.69
	error		error		error	
1	.96	.96	.59	.93		
2	.93	.94	.75	.75		
3	.83	.86	.36	.41	.16	.64
4	.69	.74	.03	.33	.11	.85
5	.51	.54	.23	.48	.01	.81
6	.71	.72	.23	.47	.23	.51

Tabel 5.4-B Correlatie coeff. tussen modelgegevens en empirische data voor PP.J (product moment correlaties)

Trial	Stap input		Sinus Input periode- 24 sec.		Sinus Input periode- 36 sec.	
	Lin. model	Nonlin. model M20	Lin. model	Nonlin. model M31	Lin. model	Nonlin. model M12
	respons		respons		respons	
1	.44	.89	.40	.33		
2	.32	.83	.71	.75		
3	.47	.37	.70	.81	.79	.88
4	.55	.64	.54	.82	.74	.87
5	.27	.64	.78	.94	.70	.74
6	.49	.78	.73	.86	.72	.89
	error		error		error	
1	.93	.92	.19	.62		
2	.78	.77	.16	.79		
3	.53	.53	.10	.90	.37	.94
4	.81	.81	.03	.89	.27	.92
5	.69	.68	.01	.91	.20	.76
6	.73	.73	.07	.86	.23	.93

Voor stapinput df = 11 voor  $r = .553$   $p < .05$   
two tailed

Voor sinusinput df = 22 voor  $r = .404$   $p < .05$   
two tailed

Tevens kunnen we onderzoeken of het lineaire model een even goede prestatie levert als het niet-lineaire, in vergelijking met de empirische data. Een vaak gebruikte maat voor de prestatie is de rms (root mean square) van de error en van de respons respectievelijk rms-error en rms-effort. (Zie tabel 5.5A en 5.5B op blz. 157.)

(Voor de formulering van de rms zie vergelijking 7.1, par. 7.4).

Tabel 5.5- A

RMS - waarden van modeldata en empirische data ( trial 1,2,3,5,6 )

PP.T	Stap input		Sinus input periode = 24 sec.			Sinus input periode = 36 sec.		
	RMSE	RMS effort	RMSE		RMS effort	RMSE		RMS effort
Lin. model Staphoogte van 7 volt	.90	6.45	AMPL 10 V.	3.33	7.78	AMPL 7 V.	4.50	7.01
M10	1.43	8.49	M11	1.31	7.63	M12	.79	6.43
M20	1.00	6.55	M21	1.08	5.65			
Trial 1 x	1.38	8.52		1.32	7.45			
2 x	1.08	9.04		.85	7.18			
3	.70	7.42		.59	6.64		.71	6.45
4	.81	7.44		.49	6.25		.77	6.24
5	.48	7.40		.70	6.39		.73	6.60
6	.58	7.58		.77	6.82		.58	5.42

\* Hoogte van de stap = 9 volt: trial 3,4,5,6 met staphoogte = 7 v.

Amplitude van de sinus = 10 volt: trial 3,4,5,6 met amplitude = 7 v.

Tabel 5.5- B

RMS - waarden van modeldata en empirische data ( trial 1,2,3,5,6 )

PP. J	Stap Input		Sinus input periode = 24 sec.			Sinus Input periode = 36 sec.		
	RMSE	RMS effort	RMSE		RMS effort	RMSE		RMS effort
Lin. model Staphoogte van 7 volt	2.05	5.82	AMPL 7 V.	3.77	7.42	AMPL 7 V.	1.14	5.68
M10	2.42	7.24	M31	.72	6.86		.74	6.41
M20	1.88	5.82						
Trial 1 x	2.42	7.16		2.75	7.45			
2 x	2.13	8.27		1.88	7.18			
3	1.41	6.16		1.06	6.64		.92	5.43
4	1.18	6.21		.84	6.25		.80	6.14
5	1.58	6.49		.83	6.39		1.21	5.96
6	1.38	6.63		.66	6.82		.84	6.10

\* Hoogte van de stap = 9 volt: trial 3,4,5,6, met staphoogte = 7 volt.

Amplitude van de sinus = 10 volt: trial 3,4,5,6 met amplitude = 7 volt.

Omdat voor de operator de afgelezen fout (input) en de respons (output) van belang zijn, zullen we van beide variabelen de correlatie-coëfficiënten tussen de modellen en de empirische gegevens weergeven; dit geldt ook voor de rms-waarden.

We hebben data verzameld van het sturgedrag van twee ppn., pp. T en pp. J (Zie Hoofdstuk VI, par. 6.2).

Uit tabel 5.4A kunnen we afleiden dat t.a.v. de stap-input, zowel het lineaire als het niet-lineaire model nagenoeg even hoog correleren met de empirische data van de trials 1 t/m 6. Dit geldt voor de respons en voor de error. De rmse (root mean square error) is voor het lineaire model .90 en voor model M20, waar het mee overeenkomt wat betreft de hoogte van de stap-input 1.00. De rms-effort is voor beide 6.55. We kunnen hieruit afleiden dat het lineaire model iets beter overeenstemt met de empirische gegevens en dat het vanwege zijn eenvoudige structuur de voorkeur verdient boven model TM20.

Wat betreft de modellen met de sinus-input met betrekking tot pp. T (tabel 5.4A) kunnen we afleiden dat de niet-lineaire modellen hoger correleren met de empirische gegevens dan het lineaire model en dat de rmse voor het lineaire model beduidend hoger ligt dan de rmse van het niet-lineaire model.

De rmse van de niet-lineaire modellen ligt meer in de buurt van de rmse van de empirische gegevens. De gemiddelde energie van de respons van het lineaire model is van ongeveer gelijke grootte als model M11; beide hebben dezelfde input amplitude. De rms-effort van het lineaire model is groter voor de sinus met een periode van 36 sec., terwijl deze waarde in model TM12 overeenkomt met de rms-effort van de empirische waarden. Wat betreft de sinus-input kunnen we met betrekking tot pp. T concluderen, dat het niet-lineaire model beter overeenstemt met de empirische gegevens van trial 1 t/m 6.

Als argument tegen deze conclusie zou men kunnen aanhalen dat het percentage verklaarde variantie

van de regressie analyse voor pp. T nogal laag is. Wanneer we kijken naar het percentage verklaarde variantie bij pp. J zouden we op grond van deze redenering kunnen verwachten dat het lineaire model ongeveer dezelfde resultaten moet leveren als het niet-lineaire. Tabel 5.4B laat zien dat met betrekking tot de stap-input de respons van het niet-lineaire model, op een coëfficiënt na, hoger correleert met de empirische gegevens van trial 1 t/m 6 dan het lineaire model. De error van beide modellen correleert nagenoeg even hoog met de empirische gegevens. De rmse van de stap-input is echter voor het lineaire model groter dan voor het niet-lineaire model (M20 heeft een stap-hoogte van 7 Volt). De rmse van model M20 van pp. J ligt tussen de empirische gegevens van de trials 1 t/m 6 en het lineaire model in.

In dit geval kan men concluderen dat het niet-lineaire model voor de stap-input beter overeenstemt met de empirische gegevens dan het lineaire model. Met betrekking tot de beide sinus-inputs valt op dat de correlaties tussen het niet-lineaire model en de empirische gegevens van de trials hoger zijn dan tussen het lineaire model en de trials. Dat geldt vooral voor de error. Dit betekent dat het lineaire model een error genereert die veel afwijkt van de empirische data.

De overeenkomst tussen de error van het niet-lineaire model en de empirische data is daarentegen groot. Ten aanzien van de rmse van de sinus-input met een periode van 24 sec. blijkt dat het lineaire model slechtere resultaten levert dan het niet-lineaire model dat veel dichterbij de buurt ligt van de empirische gegevens, terwijl de rms-effort van het lineaire model ook hoger is dan de overeenkomstige empirische gegevens van de trials 3, 4, 5 en 6.

Ook hier stemt het niet-lineaire model beter overeen met de empirische gegevens. Bij de sinus met een periode van 36 sec. is de rmse van het lineaire model



groter dan 3 rmse-waarden van de empirische gegevens, de rmse-waarde van het niet-lineaire is lager dan alle rmse-waarden van de empirische gegevens.

De correlatie-coëfficiënten van het lineaire model en de empirische gegevens zijn beduidend lager dan de correlatie-coëfficiënten van het niet-lineaire model en de empirische gegevens. Ook wat betreft pp. J kunnen we concluderen dat het niet-lineaire model beter overeenstemt met de empirie dan het lineaire model.

Samenvattend concluderen we dat voor beide ppn. een niet-lineair model een betere benadering is dan een lineair model.

Wanneer we de resultaten van de regressie analyse combineren met de analyse van lineaire en niet-lineaire modellen, kunnen we het volgende concluderen. Het lineaire model met constante gewichten voor de proportionele ( $e$ ) en de differentiële term ( $\Delta e$ ) is een minder goede benadering van de empirische gegevens. We hebben daarom besloten dit eenvoudige model te vervangen door een meer ingewikkeld. Dit model is niet-lineair en bevat produkt termen.

De term  $\int e \cdot \Delta e$  hebben we in dit model gedefinieerd als de taak-stress. We hebben dit als volgt gesimuleerd:

DIR1.K = CLIP (POS, NEG, CERR1.K,0) 6.1,A

POS = 1 6.2,C

NEG = -1 6.3,C

DIR1 - DIRECTION INDICATOR 1 (DIMENSIONLESS)

POS - POSITIVE SIGN

NEG - NEGATIVE SIGN

PROPSM1.K = (DIR1.K)(AERROR1.K)(W) 6.4,A

W = .03 6.5,C

PROPSM1 - PROPORTIONAL ERROR STRESS MEASURE 1  
(SCALE UNITS)

W - SCALING FACTOR (DIMENSIONLESS)

DIFSM1.K = (CERR1.K)(SD1.K) 6.6,A  
 DIFSM1 - DIFFERENTIAL ERROR STRESS MEASURE 1  
 (SCALE UNITS)

SD1.K = CLIP (SD11.K, POS, CERR1.K, -.04) 6.7,A  
 SD1 - STRESS DIRECTION 1 (DIMENSIONLESS)

SD11.K = CLIP (POS, NEG, CERR1.K, 0) 6.8,A  
 SD11 - STRESS DIRECTION 1 CONDITION 1  
 (DIMENSIONLESS)

SSCR1.KL = (PROPSM1.K)(DIFSM1.K)(<sup>1</sup>/STAT) 6.9,R  
 STAT = 2 6.10,C

SSCR1 - SPEED STRESS CHANGE RATE 1  
 (SCALE UNITS<sup>2</sup>/TIME)  
 STAT - STRESS ADJUSTMENT TIME (TIME)

S1.K = S1.J + (DT)(SSCR1.JK) 6.11,L

S1 = .3 6.12,N  
 S1 - STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

TS1.K = MAX (0, S1.K) 6.13,A  
 TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

Het signaal-stroomdiagram dat bij de taak-stress  
 hoort ziet er als volgt uit. (Zie fig. 5.10 - blz.  
 162.)

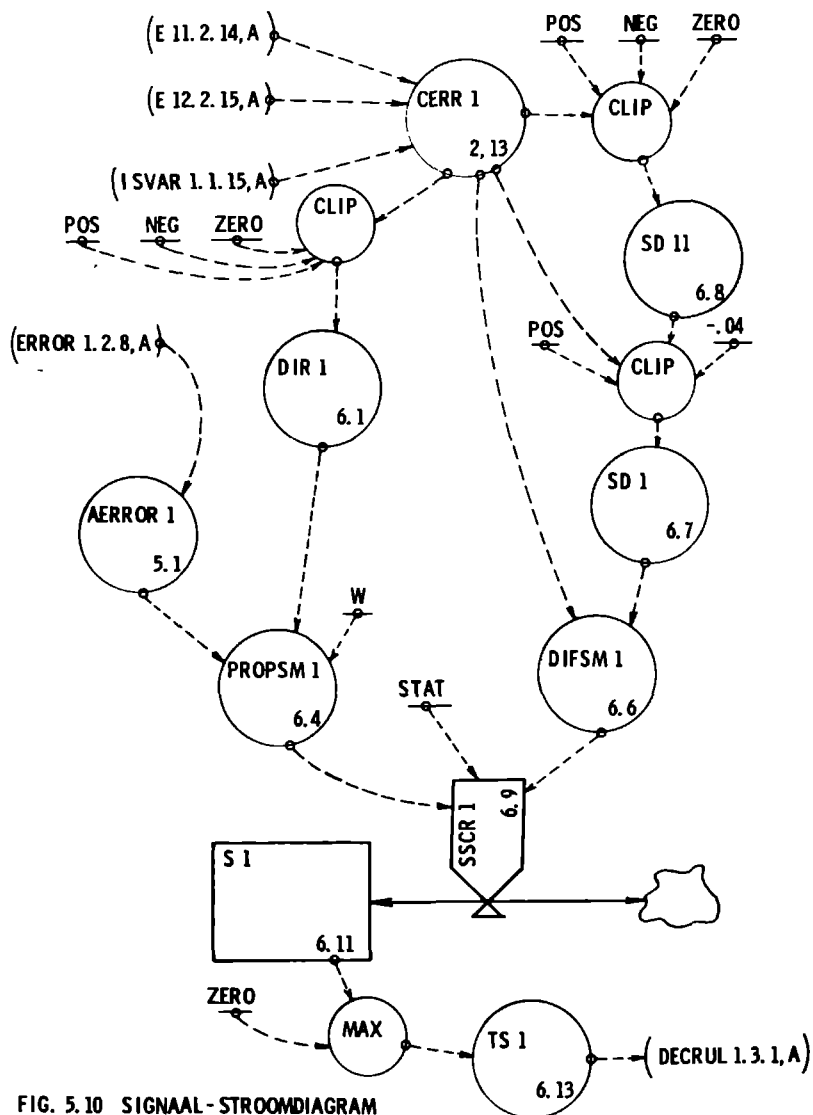


FIG. 5.10 SIGNAL - STROOMDIAGRAM  
VAN TAAKSTRESS

Uit de vergelijkingen is af te lezen dat de stress afneemt wanneer de verandering van de error (CERR1) kleiner is dan nul en groter dan  $-.04$ .

We hebben de waarde  $-.04$  willekeurig gekozen, we willen er slechts mee aanduiden dat de stress gedurende korte tijd afneemt, om daarna weer toe te nemen, ook al gaat de wijzer de goede richting uit. Ook de schaalfactor  $W$  is willekeurig gekozen zodat de taak-stress gemiddeld ongeveer van de grootte orde 1 is, gedurende de trial.

Omdat we ook niet weten op welk punt van een hypothetische stress-schaal een besturing van een derde-orde proces met een tijdconstante van 12 sec. ligt, hebben we  $.3$  als beginwaarde gekozen.

Uit de vergelijking volgt dat de stress bepaald wordt door het produkt van fout en verandering van fout. Dit houdt in dat wanneer de fout constant blijft van grootte, ook de stress constant blijft ( $\Delta e = 0$ ). We nemen aan dat de taak-stress niet negatief kan worden, wat betekent dat hij minimaal nul wordt.

## 5.9 Samenvatting

In dit hoofdstuk hebben we de bouwelementen aangebracht voor een model van een mens-machine systeem. Het proces, een derde-orde looptijd met een tijdconstante van 12 sec., wordt verstoord door een stap- of sinusvormige input. De verandering is na enige tijd waar te nemen op het display. Uit de momentane wijzerstanden kan de operator opmaken wat de geïntegreerde fout is (bij een stap-input), wat de positionele fout en wat de verandering van fout is. Aan elk van deze componenten wordt een gewicht toegekend. De compositie van de gewogen foutenkenmerk is de decisieregel of strategie die de operator hanteert om het proces bij te sturen. De taak-stress is van invloed op de wijze van ingrijpen door de operator, d.w.z. naarmate de taak-

stress verandert zullen ook de waarden die aan de verschillende termen in de beslissingsregel worden toegekend, veranderen. In termen van een continue tracking taak vertaald, betekent het, dat wanneer een wijzer wegloopt van zijn gewenste waarde, de stress toeneemt. De operator zal sneller op de continue reeks stimuli moeten reageren. In dat geval zal hij meer gewicht toekennen aan de verandering van de error, zeker wanneer hij te maken heeft met een traag proces (Licklider, 1960).

Reeds vooruitlopend op de analyse in de hoofdstukken VI en VII hebben we in par. 5.7 en 5.8 aangetoond dat een lineair model een minder goede benadering is dan een niet-lineair model. Dit niet-lineaire model bevat produkt termen en de term  $\int e \cdot \Delta e$  hebben we gedefinieerd als de taak-stress. Ingebouwd is de mogelijkheid de taak-stress te laten afnemen. Dit kan slechts onder de conditie dat de error afneemt en dat de verandering van error in deze situatie beneden een drempelwaarde blijft.

## HOOFDSTUK VI

### DE UITVOERING VAN HET EMPIRISCHE ONDERZOEK EN EEN ANALYSE VAN DE DATA.

#### 6.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we een model ontwikkeld van een mens-machine systeem. We hebben het gedetailleerd beschreven wat betreft het te besturen proces, het interface tussen mens en proces en de menselijke waarneming en responsie. Ten aanzien van de beslissingsregel die de operator hanteert, hebben we opgemerkt dat deze afhankelijk is van de waargenomen fout, de verandering van de fout en de geaccumuleerde fout, wat betreft de stapvormige input. Voor de sinusvormige input is de beslissingsregel afhankelijk van de waargenomen fout en de verandering van de fout. Onder de fout wordt verstaan het verschil tussen de gewenste waarde en de waargenomen waarde van de meterstand. Tevens hebben we opgemerkt dat het gewicht dat aan elk van deze aspecten van het waargenomen signaal wordt toegekend, afhankelijk is van de taak-stress van de operator. Met deze mathematische beschrijving als uitgangspunt zijn we gaan zoeken naar die beslissingsregel, die ons in staat stelt het gedrag van een vergelijkbaar mens-machine systeem na te bootsen. Voordat we op het aanpassen van het model aan empirische gegevens ingaan, zullen we eerst vermelden op welke wijze we deze gegevens hebben verzameld.

#### 6.2 Experimentele opzet

Voor het verkrijgen van een derde-orde proces met een tijdconstante van 12 sec. hebben we gebruik gemaakt van een analoge rekenmachine. Deze machine

werd tevens gebruikt voor het genereren van de input resp. stap en sinus. De staphoogte kon evenals de amplitude van de sinus worden gevarieerd tussen -10 en +10 Volt. We hebben gekozen voor twee sinusen, een met een periode van 24 sec. en een met een periode van 36 sec. Tevens was het mogelijk het teken van de stap en sinus te wijzigen. Dit betekende dat de wijzer van de voltmeter die aan dit proces was gekoppeld kon weglopen naar links (negatief) of naar rechts (positief) afhankelijk van het teken van de input.

De operator kon door aan een regelknop te draaien, proberen de meter naar zijn gewenste waarde terug te sturen. Zoals we reeds uit de onderzoeken van Conklin (1957) mochten verwachten, lukte dat bij deze specifieke taak niet voor de sinusvormige input. Wat de operator kon waarnemen op de meter was de wijzerstand, die het gecombineerde gevolg is zowel van de input als van zijn eigen responsie, (compensatoire stuurtaak); dit alles vertraagd weergegeven. De meterstand kon variëren tussen -10 Volt en +10 Volt. De regelknop in uiterste stand naar links gedraaid, kwam overeen met -10 Volt, in uiterste stand naar rechts gedraaid met +10 Volt. Meter en regelknop zijn compatibel. De responsies van de operator bestaan uit het draaien aan de knop. De input, de fout en de responsies worden opgenomen op een analoge bandrecorder waarna het mogelijk wordt de gegevens te verwerken d.m.v. een pdp-9. De duur van de trials is voor de stap-input 40 sec. en voor de sinus-input 75 sec. Deze tijden worden geregeld door een tijd klok.

### Proefpersonen

De gegevens werden verzameld van het stuurgedrag van twee proefpersonen. Beide zijn studenten van ongeveer 25 jaar. De ppn. werden geïnformeerd over de aard van de stuurtaak, waarbij ze ingelicht werden over de kenmerken van de respons van een traag pro-

ces op een stap-input en een sinus-input. Vervolgens werd gedurende twee maanden regelmatig geoefend om de ppn. vertrouwd te doen raken met de dynamische kenmerken van de opstelling.

### Instructie

Om de ppn. zoveel mogelijk zelf de strategie van bijsturen te laten bepalen, werd hen de volgende algemene instructie gegeven: "Probeer de meter zo goed mogelijk op de gewenste waarde te houden."

### Procedure

De pp. werd geïnformeerd over de soort van input in het proces, zonder dat hem de grootte en richting van de stap of amplitude van de sinus werd meegegeeld. Voor elke trial werd hij gewaarschuwd dat hij een stap of sinus zou moeten bijsturen. Voor deze procedure is gekozen om te voorkomen dat de pp. eerst moet gaan gissen wat de aard is van de input alvorens de meest geschikte strategie te kiezen. Omdat we dit soort onzekerheid niet in het model hebben ingebouwd, meenden we ze ook te moeten elimineren uit het experiment. Dat dit nuttig is geweest bleek enkele keren tijdens het experiment. Wanneer een pp. zich in eerste instantie toch nog vergist had in de input, verzocht hij deze trial te "skippen" omdat hij van een verkeerde strategie had gebruik gemaakt. Het bleek namelijk dat hij voor de verschillende inputs ook verschillende regelstrategieën hanteerde (pp. T). Omdat het vooral interessant is te bestuderen hoe een operator begint bij te sturen wanneer de afwijking van de meterstand ten gevolge van het optreden van de input waarneembaar wordt, hebben we de betreffende data resp. de error en respons vanaf het begin van het optreden van de input geregistreerd. Deze periode met het inslingeren van de input is vooral van belang omdat ze ons een inzicht kan verschaffen in de wijze waarop de opera-



tor een optredende storing kan opvangen. Vooral bij trage processen is dit zinvol omdat het effect van fouten die de operator maakt, veel langer een rol blijft spelen.

De op deze wijze verkregen empirische gegevens dienden als uitgangspunt voor het aanpassen van het simulatiemodel, zodanig dat er een redelijke overeenstemming bestaat tussen model- en empirische data.

### 6.3 Het aanpassen van het model aan empirische gegevens

Voordat we ingaan op de wijze waarop we het model hebben aangepast aan de verkregen empirische data, zullen we eerst de meer algemene problematiek van de identificatie van modellen kort weergeven.

Hanken (1970) definieert het identificatieprobleem als volgt:

"Gegeven: een systeem  $S$  met zijn omgeving  $E$  en een probleemstelling  $P$ , die op dit universum  $U$  betrekking heeft. Tracht een model  $M$  te construeren zodanig, dat deze probleemstelling oplosbaar blijkt te zijn."

Voor het gebied van onderzoek waar ons onderzoek op betrekking heeft, geldt echter de volgende beperking die door Aström en Eykhoff (1971) wordt gesignaleerd:

"Throughout the history of automatic control it has been known that the knowledge about a system and its environment, which is required to design a control system, is seldom available a priori. Even if the equations governing a system are known in principle it often happens that knowledge of particular parameters is missing."

Schoeffler (1968) onderscheidt de volgende stappen. Hij baseert zich op de definitie van een systeem zoals gegeven door Mesarovic (1968, 1970).

Mesarovic definieert een abstract systeem (of model) als een relatie tussen input en output verzamelingen.

Deze definitie van Mesarovic komt overeen met de formulering van Zadeh en Polak (1969) die een systeem, aangeduid met de naam "abstract object", definiëren als een verzameling van input - output paren. Volgens Schoeffler zullen eerst met zorg de inputs en outputs van het systeem gekozen moeten worden. De volgende stap zal moeten zijn, de keuze van de structuur van het mathematisch model. Tenslotte wanneer de structuur is vastgelegd, zal de vorm van de mathematische relaties moeten worden uitgekozen, waarna de parameters overblijven, die bepaald moeten worden door het model aan te passen aan de experimentele data.

Zadeh en Desoer (1963) onderscheiden bij het identificatie probleem drie grootheden, een klasse van modellen, een klasse van inputsignalen en een criterium. Hoewel zij niet expliciet spreken van outputsignalen is het redelijk te veronderstellen dat zij deze laten vallen onder het criterium. Outputvariabelen zijn namelijk doelvariabelen en alleen zij kunnen aan een criterium geëvalueerd worden. Ook is de veronderstelling redelijk omdat Zadeh een systeem definieert als een verzameling van input-output relaties.

Hanken (1970) baseert zich op dezelfde uitgangspunten en hij merkt op dat het identificatieprobleem betrekking heeft op de stap van de waarnemingsgegevens naar het model. Hij verdeelt deze stap in drie kleinere stappen:

- 1 de selectie van het type model,
- 2 het theoretisch onderzoek van het model, nl. of het al of niet geschikt is om de waarnemingsgegevens op een eenduidige wijze voor te stellen,
- 3 het bepalen van de parameters van het model, waarbij het modeltype als een gegeven wordt aangenomen.

Wanneer we deze beschouwing toepassen op ons onderzoek dan kunnen we datgene wat we in Hoofdstuk V

hebben beschreven als volgt samenvatten.

We hebben gekozen voor een stelsel van differentievergelijkingen, die in een bepaalde vorm zijn geschreven (DYNAMO) en als uitgangspunt dienen voor het ontwikkelen van een simulatiemodel. We hebben reeds gedetailleerd het model uitgeschreven en waar mogelijk de parameters ingevuld zoals ze uit een literatuuronderzoek voorhanden bleken. Omdat onze probleemstelling is, het analyseren van de eigenschappen van een (traag) mens-machine systeem, daarbij vooral lettend op de regelstrategieën van de ppn., hebben we gekozen voor deterministische inputs (stappen en sinussen). Stochastische inputs hebben n.l. de volgende twee bezwaren, die we met dit model niet kunnen ondervangen. Ten eerste wordt door de ruisvormige input een extra onzekerheidsfactor voor de operator ingevoerd, naast de momentane grootte van de amplitude en snelheid van verandering van het signaal. Deze factor heeft te maken met de grotere onzekerheid van de operator betreffende de vorm van het signaal.

Omdat we geïnteresseerd zijn in de regelstrategie van de operator bij het sturen van trage systemen, waarbij vooral de traagheidsfactor de belangrijke rol speelt, hebben we de onzekerheidsfactor wat betreft de input zo veel als mogelijk gereduceerd.

De andere reden waarom we niet gekozen hebben voor een stochastisch inputsignaal heeft betrekking op het experiment. Wil men een inzicht krijgen in het regelgedrag van de operator wanneer als input een stochastisch signaal wordt gebruikt, dan zal men het experiment lang genoeg moeten laten lopen om de operator in staat te stellen een schatting te maken van de parameters van het inputsignaal (bijv. gemiddelde en variantie).

Naast het feit dat dit conceptueel een ander uitgangspunt is, betekent het ook dat bij trage systemen, met gebruikmaking van trage ruis, de duur van elk experiment veel langer zal worden, wil de operator een redelijke schatting kunnen maken. In dat

geval hebben we bijv. factoren als aandachtschommelingen, vermoeidheid bij de operator, veel minder onder controle.

De keuze van de outputsignalen van het experiment leverde weinig moeilijkheden op. Geregistreerd werden de fout, d.w.z. de afwijking van de meterstand van zijn gewenste stand, en de respons van de operator om deze fout te corrigeren (het fout-sig-naal geldt als input voor het subsysteem: operator). Deze beide signalen zijn wat Hanken (op. cit.) noemt, de waarnemingsgegevens. Het zijn deze gegevens die hebben gediend als uitgangspunt voor het invullen van de ontbrekende schakels in het model. Dit heeft betrekking op de beslissingsregel, bestaande uit een compositie van:

$$G_1 \int_0^T e(t)dt, \quad G_2 e(t), \quad G_3 \frac{de}{dt}$$

waarbij wordt aangenomen dat de weegfactoren  $G_1$ ,  $G_2$  en  $G_3$  een functie zijn van de taak-stress. De methode die we voor dit laatste deel van de identificatie gevolgd hebben, kan meer in het algemeen worden aangegeven met de synthese methode (Hanken, op. cit.). Hij beschrijft deze methode als volgt:

- " - 1 Kies een aantal basismodellen  $M_i$ ,
- 2 construeer een netwerk  $UM_i$  zodanig dat geldt:  $M(s) = UM_i$ ."

Uitgegaan wordt van een beperkt aantal basiselementen en basisrelaties die zodanig aan elkaar worden verbonden dat een aanvaardbaar model wordt verkregen. De weg die op deze wijze wordt gevolgd berust op de trial and error methode. Volgens Hanken blijkt het belang van de synthese methode uit het feit dat complexe systemen kunnen worden voorgesteld door modellen die bestaan uit een zeer beperkt aantal verschillende basisoperatoren.

Wanneer men enigszins met een systeem vertrouwd is, kan men vaak uit het gedrag afleiden welke basisoperatoren voor het model nodig zijn. Forrester (1961, 1969, 1971) onderscheidt bijv. optellen, vermenigvuldigen, integreren en vertragen, als operatoren voor het ontwikkelen van empirische modellen.

Door de synthese methode toe te passen op de empirische gegevens die we d.m.v. het experiment hebben verzameld, hebben we het model van een mens-machine systeem aangepast. We hebben rekening gehouden met de beperking van het aantal basisoperatoren, zoals ze door DYNAMO (Pugh III, A.L. 1963) worden geboden.

Omdat de empirische data van beide ppn. nogal verschilden, hebben we voor elke pp. afzonderlijk het model aangepast voor wat betreft de stap-input en de sinus-input. In eerste instantie werden de modellen voor de sinus-input aangepast voor de sinus met een periode van 24 sec. De betreffende experimentele data waren in het begin van de reeks experimenten verzameld, echter nadat beide ppn. intensief hadden kunnen oefenen. Deze modellen voor de sinus-input waarvan de output goed overeenkwam met de experimentele data, werden vervolgens aangepast aan de sinus-input met een periode van 36 sec. Deze model output werd vergeleken met overeenkomstige empirische data. Het bleek dat beide tijdreeksen nogal afweken.

Omdat de betreffende empirische data van de trage-re sinus waren verzameld in de laatste fase van het experiment, d.w.z. enkele maanden na de empirische gegevens van de sinus met een periode van 24 sec., gaf de bovenvermelde afwijking tussen model gegevens en data wat betreft de sinus met een periode van 36 sec., aanleiding tot twee hypothesen.

Ofwel elke pp. hanteert voor beide sinussen een verschillende regelstrategie, ofwel zijn regelstrategie week in de beginfase af van de regelstrate-

gie in de latere fase van het experiment. Om deze hypothesen te kunnen toetsen hebben we ook twee modellen, voor elke pp. een, aangepast aan empirische data, verkregen door de langzamere sinus als input. In totaal hebben we zes ( $2 \times 3$ ) bijzondere modellen aangepast aan empirische data, die onder drie verschillende experimentele condities waren verkregen.

Hoe is dit aanpassen geschied?

Hanken (op.cit.) merkte reeds op dat deze bepaalde aanpak een trial and error methode is. Naylor (et. al., 1967) definieert simulatie als het experimenteren met abstracte modellen. In navolging van deze omschrijving zouden we het aanpassen van het simulatiemodel kunnen beschouwen als het uitvoeren van een tweede reeks experimenten (de eerste reeks was het verzamelen van empirische data). Met behulp van de empirische data werden hypothesen geformuleerd over de beslissingsstrategie die de operator zal hanteren. Deze hypothesen werden uitgeschreven in de taal van het simulatiemodel (DYNAMO), waarna aan parameters numerieke waarden werden toegekend. Voor elke conditie werd een "run" gemaakt, waarna getoetst kon worden of de hypothesen juist waren. Bleken de hypothesen niet te kloppen, dan werden nieuwe geformuleerd. Voor een schematische weergave van de modelverificatie verwijzen we naar fig. 3.1 in Hoofdstuk III.

Het iteratieve proces werd zolang gevolgd totdat de model output voldoende overeenkwam met de betreffende reeks empirische data. Als zodanig is de gevolgde methode heuristisch. Het doel dat wij hebben gesteld voor het simulatiemodel is dat het met een zo eenvoudig mogelijke structuur zo goed mogelijk overeenkomt met de empirie. Nadat deze overeenkomst eerst werd geëvalueerd d.m.v. visuele waarneming van de onderzoeker, werd vervolgens een meer algemeen hanteerbaar criterium gebruikt voor de "goodness of fit" tussen model data en empirische data.

Dit criterium is de correlatie tussen tijdreeksen van het model en experiment. Het sample interval van de tijdreeksen voor het bepalen van deze correlatie-coëfficiënten hebben we vastgesteld op 3.2 sec. Dit is als volgt bepaald.

De empirische gegevens zijn weergegeven met sample intervallen van 640 msec. De modelgegevens zijn weergegeven met sample intervallen van 100 msec. Omdat we beide tijdreeksen willen correleren, zonder dat de ene reeks in de tijd verschoven is ten opzichte van de andere, zullen we die data moeten kiezen die op gelijke intervallen voor model en experiment zijn verkregen. Het kleinste interval dat beide soort reeksen gemeen hebben is 3.2 sec. Voor de stap-input met een trial-duur van 40 sec. levert dit een tijdreeks van 12 getallen, voor de sinus-input met een trial-duur van 75 sec., een tijdreeks van 23 getallen. Voordat we de beslissingsstrategie die in de verschillende modellen werd geformuleerd, zullen weergeven, zullen we eerst de resultaten vermelden. D.w.z. we zullen eerst de correlatie-coëfficiënten weergeven tussen de model- en empirische gegevens. Een analyse van deze resultaten zal het dan mogelijk maken het verkregen inzicht in de functionele aspecten van het mens-machine systeem te relateren aan de structuur van het model.

#### 6.4 Resultaten

Zoals we reeds eerder hebben vermeld, hebben we van de pp. het fout-sigitaal (error) en het responsie-sigitaal (respons) geregistreerd. Dit maakt het mogelijk de volgende correlatie-coëfficiënten te bepalen:

- 1 de correlatie tussen de responsies ( $R \times R$ ), zie tabel 6.2A t/m 6.7A,
- 2 de correlatie tussen de responsies en de error ( $R \times E$ ), zie tabel 6.2B t/m 6.7B,
- 3 de correlatie tussen de errors ( $E \times E$ ), zie tabel 6.2C t/m 6.7C.

De modellen M10, M11 en M12 hebben we voor beide ppn. aangepast aan gegevens van een bepaalde experimentele trial. In par. 3.5 hebben we in een schema (fig. 3.1) getoond dat voor de verificatie van het model, test-data nodig zijn van het bestaand systeem. Deze test-data zijn voor onze analyse gegevens van andere trials. Als criterium voor de mate van overeenkomst tussen de modellen en empirische gegevens wordt de correlatie-coëfficiënt gebruikt (produkt-moment correlaties). Om te zien in hoeverre de verschillende configuraties van de modellen overeenkomen met de gegevens<sup>1</sup> die afkomstig zijn van de betreffende pp. zijn al deze correlatie-coëfficiënten bij elkaar gebracht in matrijzen. De matrijzen zijn weergegeven in de tabellen 6.2 t/m 6.7. Niet alleen geven deze tabellen een inzicht in de overeenkomst tussen de modellen en de empirische gegevens, maar ook tussen de modellen onderling en de empirische gegevens onderling.

- Voor de stap-input hebben we een onderscheid gemaakt tussen een staphoogte van 9 Volt (M10) en van 7 Volt (M20). TM10 en TM20 hebben betrekking op pp. T., JM10 en JM20 hebben betrekking op pp. J.
- Voor de sinus-input met een periode van 24 sec., hebben we gebruik gemaakt van drie soorten model output.
  - M11 komt overeen met een sinus met een amplitude van 10 Volt,
  - M21 komt overeen met een sinus met een amplitude van 7 Volt,
  - M31 komt overeen met een sinus met amplitude van 7 Volt, echter het is de modelstructuur die verkregen is naar aanleiding van de empirische data van de sinus met een periode van 36 sec. Dit laatste model M31 is daarom interessant omdat het het regelgedrag van de ppn. weergeeft in de laatste fase van het onderzoek,



terwijl de modellen M11 en M21 het regelgedrag weergeven in de beginfase van het experiment. De verschillen tussen de modellen geven een inzicht in de effecten van het leerproces. Ook hier geldt dat TM11, TM21 en TM31 betrekking hebben op pp. T en JM11, JM21 en JM31 op pp. J.

- Voor de sinus-input met een periode van 36 sec. hebben we wat betreft de model output een onderscheid gemaakt tussen twee modellen.
  - M12 heeft betrekking op het model met een sinus-input met amplitude van 7 Volt,
  - M22 heeft een overeenkomstige amplitude van 7 Volt en is "gefit" op de empirische data die betrekking hebben op de sinus-input met een periode van 24 sec.
- De modelstructuur van M22 komt overeen met het sturgedrag in de vroege fase van het onderzoek, die van M12 met de laatste fase van het onderzoek. (TM12 en TM22 m.b.t. pp. T; JM12 en JM22 m.b.t. pp. J)

Ter nadere verduidelijking, de modellen M12 en M31 hebben dezelfde modelstructuur. Ze verschillen slechts in de input: M31 heeft een sinus-input met een periode van 24 sec., M12 heeft een sinus-input met een periode van 36 sec. De modellen M21 en M22 hebben dezelfde modelstructuur, echter M21 heeft een sinus-input met een periode van 24 sec. en M22 een sinus-input een periode van 36 sec. Ook hier geldt dat het verschil tussen de modellen M12 en M22 een inzicht geeft in het leerproces bij de ppn., omdat M22 in de tijd voorafgaat aan M12.

Voor de resultaten zie de tabellen: 6.2A, 6.2B, 6.2C; 6.3A, 6.3B, 6.3C; 6.4A, 6.4B, 6.4C; 6.5A, 6.5B, 6.5C; 6.6A, 6.6B, 6.6C; 6.7A, 6.7B en 6.7C.

Ter verduidelijking van de codering die we aan de modellen hebben gegeven, hebben we een overzichtstabel gemaakt die aangeeft op welke data de model-

len zijn aangepast en onder welke condities ze worden geanalyseerd (zie tabel 6.1).

Uit de tabel blijkt dat de modellen M11, M21 en M22 structureel dezelfde zijn, evenals de modellen M31 en M12.

**Tabel 6.1**

**Model aangepast aan data van:**

	Stapinput	Sinus met periode van	
		24 sec.	36 sec.
<b>Conditie voor analyse. Model vergeleken met:</b> <b>1. Stapinput</b> -Staphoogte= 9 -Staphoogte= 7	M10 M20		
<b>2. Sinus periode van 24 sec.</b> -amplitude= 10 -amplitude= 7		M11 M21	M31
<b>3. Sinus periode van 36 sec.</b> amplitude= 7		M22	M12

M11, M21 en M22 zijn allen aangepast aan empirische data van een sinus-input met een periode van 24 sec. Model M22 wordt geanalyseerd onder de conditie dat de model input is gewijzigd, n.l. een sinus-input met een periode van 36 sec.

Model M31 wordt geanalyseerd onder de conditie dat de model input is gewijzigd, n.l. een sinus-input met een periode van 24 sec., terwijl het model is aangepast aan data van een sinus met een periode van 36 sec.

Ter onderscheid van de ppn. T en J gaat aan de model-codering vooraf de letter T of J, bijv. TM11 is model M11 van pp. T.

Nadat we in dit hoofdstuk de verschillende configuraties van het simulatiemodel hebben geverifieerd, wordt in Hoofdstuk VII de structuur gegeven van de beslissingsstrategie van model TM11. Voor de structuur van model TM11, JM11, TM12, JM12, TM10 en JM10 verwijzen we naar de bijlagen 1 t/m 5.

### 6.5 Analyse

-1 STAP INPUT : EMPIRISCHE DATA PP. T (tabel 6.2A, 6.2B, 6.2C)(zie blz. 179)

De data van trial 1 en 2 zijn verzameld in de beginfase van het experiment, de hoogte van de stap-input bedraagt +9 Volt. De data die betrekking hebben op de trials 3, 4, 5 en 6 zijn verzameld in de laatste fase van het experiment, de hoogte van de stap-input voor al deze trials bedraagt 7 Volt. Het model (TM10) is aangepast aan de empirische gegevens van trial 1.

Alle correlatie-coëfficiënten die worden vermeld zijn product-moment correlaties. De correlatie tussen de respons van het model (TM10) met de respons van trial 1 bedraagt .93 (tabel 6.2A) en de correlatie tussen de error van model TM10 en de error van trial 1 bedraagt .97 (zie tabel 6.2C). Beide coëfficiënten zijn zeer significant,  $p < .01$ . De correlaties tussen de respons van TM10 en de error van trial 1 zijn alle niet significant. Hieruit kan worden geconcludeerd dat model TM10 voldoende goed overeenstemt met trial 1.

Tabel: 6.2 A		Stap input		Emp. data PP.T		Corr: resp x resp				
				Emp. data: (1, 2, 3, 4, 5, 6)						
RxR	TM10	TM20	JM10	JM20	1	2	3	4	5	6
TM10	-									
TM20	.90	-								
JM10	.54	.55	-							
JM20	.40	.41	.92	-						
1	.93	.93	.40	.19	-					
2	.77	.95	.59	.45	.83	-				
3	.60	.51	-.02	.07	.52	.35	-			
4	.50	.66	.33	.26	.53	.62	.27	-		
5	.39	.33	-.09	.17	.39	.28	.58	.35	-	
6	.63	.56	.22	.15	.57	.44	.65	.55	.88	-

Tabel: 6.2 B		error		respons		Corr: resp. x error				
RxE	TM10	TM20	JM10	JM20	1	2	3	4	5	6
TM10	-.15	-.33	-.38	-.31	-.25	-.46	-.14	-.15	-.22	-.26
TM20	-.12	-.32	-.28	-.22	-.24	-.45	-.15	-.19	-.23	-.25
JM10	-.24	-.36	-.70	-.76	-.14	-.47	-.01	-.27	+.06	-.14
JM20	-.23	-.32	-.59	-.73	-.07	-.39	-.06	-.26	+.12	-.08
1	-.08	-.27	-.32	-.20	-.23	-.40	-.10	-.13	-.28	-.27
2	.12	-.08	-.08	-.09	.01	-.23	-.02	-.09	-.19	-.12
3	.24	.06	.18	.17	.09	-.05	-.09	-.09	-.27	-.14
4	.21	.07	.31	.32	.06	-.03	-.07	-.14	-.36	-.16
5	.29	.25	.42	.45	.16	.21	-.09	-.03	-.58	-.37
6	.03	-.03	.01	-.01	-.03	-.05	-.15	-.27	-.40	-.40

Tabel: 6.2 C						Corr: error x error				
ExE	TM10	TM20	JM10	JM20	1	2	3	4	5	6
TM10	-									
TM20	.99	-								
JM10	.74	.73	-							
JM20	.56	.57	.95	-						
1	.97	.95	.62	.39	-					
2	.90	.94	.68	.57	.86	-				
3	.80	.86	.43	.32	.81	.92	-			
4	.64	.74	.32	.25	.65	.86	.91	-		
5	.48	.54	.06	.03	.56	.68	.81	.85	-	
6	.66	.72	.51	.43	.67	.82	.80	.82	.82	-

Bij de verdere analyse blijkt dat de correlatie tussen de responsies van model TM10 met de responsies van de trials 2, 3, 4, 5 en 6 veel overeenkomst vertoont met de correlatie tussen de respons van trial 1 en de responsies van de trials 2, 3, 4, 5 en 6. Ditzelfde geldt ook voor de betreffende correlaties tussen de errors. Vooral uit de correlaties tussen de responsies valt af te leiden dat de pp. niet steeds hetzelfde regelgedrag vertoonde. Desondanks geeft het model TM10 een betrouwbaar en stabiel beeld van het stuurgedrag van pp. T; ditzelfde geldt voor model TM20, (staphoogte = 7 in plaats van 9 Volt).

Uit de lage correlaties tussen respons en error (zie tabel 6.2B) is af te leiden dat deze pp. in geringe mate stuurt op basis van de meterstand. Uit latere analyse zal blijken dat hij tracht de traagheid van het proces te compenseren.

De staphoogte van de trials 1 en 2 bedraagt 9 Volt en de staphoogte van de trials 3, 4, 5 en 6 bedraagt 7 Volt. Dit geldt voor de tabellen 6.2 en 6.3.

De correlatie-coëfficiënten zijn voornamelijk negatief, omdat respons en error aan elkaar tegengesteld zijn. Voor die gevallen waarbij dit niet opgaat geldt als verklaring dat de pp. in de ene situatie gemiddeld een te grote respons heeft gegeven, tengevolge waarvan het error-sigitaal hetzelfde teken krijgt als de respons. Wordt deze tijdreeks van de error gecorreleerd met de respons van een andere trial, waarbij zich dit verschijnsel niet heeft voorgedaan, dan kan de coëfficiënt positief worden.

De correlaties tussen de predicties van het model JM10, respectievelijk JM20, en de empirische gegevens van trial 1, 2, 3, 4, 5 en 6 zijn over het algemeen veel lager dan de overeenkomstige correlaties van de modellen die op pp. T betrekking hebben. Dit betekent dat pp. T en pp. J verschillen in hun

stuurgedrag. Dat blijkt o.a. uit de correlaties tussen de respons en de error van de modellen JM10 en JM20 (zie tabel 6.2B). De correlaties die betrekking hebben op pp. T zijn laag, de correlaties voor pp. J (JM10 en JM20) zijn daarentegen hoog en significant ( $p < .05$  voor  $R_{JM10} \times E_{JM20}$  en  $p < .01$  voor de drie andere.)

Dit is een aanwijzing dat pp. J veel meer let op de meterstand bij het regelen dan pp. T.

-2 STAP INPUT: EMPIRISCHE DATA VAN PP. J (tabel 6.3A, 6.3B, 6.3C) (zie blz. 182)

Ook hier geldt dat het model JM10 goed overeenkomt met trial 1, waar het is van afgeleid. De correlatie-coëfficiënt tussen de responsies is .97 en de correlatie-coëfficiënt tussen de errors .99 ( $p < .01$ ). In het algemeen zijn de correlatie-coëfficiënten tussen de respons en de error hoger dan bij pp. T, wat een aanwijzing is dat deze pp. meer bijstuurt als gevolg van de meterstand.

De correlatie-coëfficiënten tussen de onderlinge responsies en de onderlinge errors zijn gemiddeld hoog en ze vertonen een geringere spreiding (tabel 6.3A, 6.3C). Waarschijnlijk is dit te wijten aan het regelgedrag van deze pp. dat meer rekening houdt met de meterstand.

De correlaties tussen de predicties van het model TM10, respectievelijk TM20 en de empirische gegevens van pp. J zijn hoog. Dit betekent dat de modelstructuur van model TM10 een meer algemeen beeld geeft van het stuurgedrag van beide ppn. en dat model JM10 meer specifiek is voor pp. J.

**Tabel: 6.3 A**      **Stap input**      **Emp. data PP. J**      **Corr: resp x resp**  
**Emp. data: ( 1, 2, 3, 4, 5, 6 )**

RxR	TM10	TM20	JM10	JM20	1	2	3	4	5	6
TM10	-									
TM20	.90	-								
JM10	.54	.55	-							
JM20	.40	.41	.92	-						
1	.49	.51	.97	.89	-					
2	.63	.62	.94	.83	.91	-				
3	.82	.90	.53	.37	.52	.67	-			
4	.82	.91	.64	.64	.59	.67	.82	-		
5	.69	.71	.78	.64	.80	.88	.80	.65	-	
6	.75	.79	.91	.78	.92	.91	.80	.79	.90	-

**Tabel: 6.3 B**      **error**      **respons**      **Corr: resp x error**

RxE	TM10	TM20	JM10	JM20	1	2	3	4	5	6
TM10	-.15	-.33	-.38	-.31	-.40	-.16	-.24	-.33	-.07	-.41
TM20	-.12	-.32	-.28	-.22	-.28	-.06	-.22	-.32	+.03	-.33
JM10	-.24	-.36	-.70	-.76	-.65	-.51	-.29	-.58	-.24	-.59
JM20	-.23	-.32	-.59	-.73	-.52	-.43	-.27	-.61	-.17	-.48
1	-.20	-.33	-.72	-.77	-.68	-.51	-.27	-.54	-.26	-.60
2	-.08	-.24	-.61	-.62	-.61	-.37	-.17	-.37	-.16	-.51
3	-.29	-.41	-.47	-.32	-.47	-.28	-.37	-.35	-.21	-.53
4	-.14	-.35	-.43	-.44	-.42	-.22	-.29	-.49	+.06	-.42
5	+.00	-.18	-.49	-.48	-.50	-.24	-.06	-.27	+.03	-.39
6	-.01	+.18	-.39	-.41	-.37	-.12	-.05	-.29	+.08	-.31

**Tabel: 6.3 C**      **Corr: error x error**

ExE	TM10	TM20	JM10	JM20	1	2	3	4	5	6
TM10	-									
TM20	.99	-								
JM10	.74	.73	-							
JM20	.56	.57	.95	-						
1	.77	.74	.99	.92	-					
2	.90	.86	.92	.77	.95	-				
3	.96	.94	.71	.52	.74	.85	-			
4	.91	.92	.89	.81	.89	.91	.83	-		
5	.94	.91	.85	.68	.89	.98	.87	.90	-	
6	.94	.94	.86	.73	.87	.95	.86	.94	.97	-

### -3 SINUS INPUT PERIODE 24 SEC.: EMPIRISCHE DATA VAN PP. T (tabel 6.4A, 6.4B, 6.4C)

Tabel: 6.4 A input: sinus periode 24 sec. Emp. data PP. T Corr. matrijs resp x resp  
Emp. data: (1, 2, 3, 4, 5, 6)

RxR	TM11	TM21	TM31	JM11	JM21	JM31	1	2	3	4	5	6
TM11	-											
TM21	.82	-										
TM31	.69	.40	-									
JM11	.58	.72	.39	-								
JM21	.40	.58	.33	.85	-							
JM31	.88	.68	.78	.43	.34	-						
1	.80	.72	.49	.43	.22	.75	-					
2	.76	.69	.68	.41	.33	.88	.73	-				
3	.47	.45	.25	.00	.02	.63	.29	.59	-			
4	.51	.47	.33	.00	.10	.69	.56	.74	.87	-		
5	.66	.52	.65	.11	.14	.81	.59	.74	.69	.72	-	
6	.29	.45	.07	.03	.00	.45	.41	.66	.74	.83	.56	-

Tabel: 6.4 B error respons Emp. data PP. T Corr. matrijs resp x error

RxE	TM11	TM21	TM31	JM11	JM21	JM31	1	2	3	4	5	6
TM11	-.56	-.64	-.31	-.71	-.60	-.45	-.46	-.35	-.11	-.08	-.26	-.10
TM21	-.61	-.83	-.30	-.84	-.71	-.48	-.54	-.46	-.15	-.14	-.23	-.18
TM31	-.67	-.61	-.71	-.82	-.72	-.62	-.44	-.50	-.07	-.05	-.39	+.06
JM11	-.51	-.67	-.35	-.98	-.82	-.36	-.38	-.33	-.09	+.08	-.02	+.09
JM21	-.49	-.64	-.34	-.98	-.83	-.33	-.36	-.31	-.11	+.10	-.00	+.11
JM31	-.88	-.79	-.69	-.74	-.60	-.88	-.74	-.77	-.40	-.43	-.61	-.26
1	-.41	-.55	-.18	-.60	-.52	-.36	-.49	-.30	-.07	-.11	-.20	-.15
2	-.51	-.61	-.35	-.71	-.63	-.49	-.52	-.51	-.08	-.15	-.16	-.17
3	-.63	-.69	-.41	-.57	-.44	-.75	-.45	-.69	-.64	-.56	-.52	-.49
4	-.62	-.57	-.26	-.25	-.11	-.71	-.60	-.72	-.77	-.82	-.61	-.71
5	-.82	-.68	-.71	-.46	-.42	-.88	-.65	-.71	-.57	-.55	-.83	-.35
6	-.61	-.66	-.43	-.49	-.46	-.74	-.65	-.79	-.65	-.75	-.66	-.72

Tabel: 6.4 C Emp. data PP. T Corr. matrijs error x error

RxE	TM11	TM21	TM31	JM11	JM21	JM31	1	2	3	4	5	6
TM11	-											
TM21	.87	-										
TM31	.75	.73	-									
JM11	.75	.85	.83	-								
JM21	.74	.84	.83	1.00	-							
JM31	.73	.78	.85	.70	.69	-						
1	.93	.83	.60	.66	.64	.63	-					
2	.75	.73	.71	.76	.74	.74	.74	-				
3	.41	.57	.53	.49	.48	.74	.30	.47	-			
4	.33	.35	.19	.17	.14	.58	.30	.38	.66	-		
5	.48	.45	.65	.38	.37	.81	.34	.46	.71	.63	-	
6	.47	.53	.44	.41	.40	.69	.50	.49	.69	.77	.64	-



De trials 1 en 2 hebben betrekking op data uit de beginfase van het experiment, de trials 3, 4, 5 en 6 op de laatste fase van het experiment. Tevens draagt de amplitude van de input bij de trials 1 en 2, 10 Volt en bij de andere 7 Volt. Het model TM11 is aangepast aan data van trial 1, de correlatie-coëfficiënten  $R \times R$  en  $E \times E$  (respons  $\times$  respons en error  $\times$  error) zijn respectievelijk .80 en .93, d.w.z. de overeenkomst tussen model en trial 1 is significant ( $p < .01$ ). (Zie tabel 6.4A, 6.4C).

De correlatie tussen  $R_{TM11} \times E_1$  is -.41, de correlatie  $R_1 \times E_{TM11}$  is -.46 en  $R_1 \times E_1$  is -.49. Deze correlaties zijn significant ( $p < .05$ ). Ook deze coëfficiënten zijn een aanwijzing dat het model TM11 betrouwbaar het regelgedrag van trial 1 weergeeft.

De correlaties ( $R \times R$  en  $E \times E$ ) tussen de predicties van model TM11 en de empirische gegevens van trial 2, 3, 4, 5 en 6 vertonen veel overeenkomst met de overeenkomstige correlatie-coëfficiënten van trial 1 met de trials 2, 3, 4, 5 en 6 (tabel 6.4A, 6.4C). Model TM21, dat een sinus-input heeft met amplitude van 7 in plaats van 9 Volt (TM11) komt wat betreft de correlatie beter overeen met de empirische data dan model TM11. In het algemeen is er een significante overeenkomst tussen het model TM11 en vooral tussen model TM21 en de empirische data.

De correlaties ( $R \times E$ ) tussen de predicties van het model TM11, respectievelijk TM21 en de empirische gegevens van trial 1, 2, 3, 4, 5 en 6 zijn allen hoog. (Zie tabel 6.4B).

De correlaties tussen de respons van de trials en de error van de modellen TM11 en TM12 zijn enkel significant voor de trials 1 en 2 en model TM21 en voor trial 1 met model TM11 ( $p < .05$ ). Deze resultaten komen overeen met de betreffende correlaties tussen de trials. Het is bijvoorbeeld niet verwonderlijk dat de correlatie tussen  $R_3$  en  $E_{TM11}$  -.11 be-

draagt, omdat de correlatie tussen  $R_3$  en  $E_1$   $-0.07$  is;  $E_{TM11}$  is namelijk afgeleid van  $E_1$ .

In het algemeen geldt dat bij de sinus-input een hoge correlatie bestaat tussen de respons en de error ( $R \times E$ ), d.w.z. pp. T regelt meer dan bij de stap-input het geval was, op basis van de meterstand.

Opvallend is dat het model TM31 minder goed past bij de empirische data. Omdat dit model is aangepast aan data van de laatste fase van het experimenteren, betrekking hebbend op de langzamere sinus als input, zou te verwachten zijn dat dit model een functionele samenhang met de trials 3, 4, 5 en 6 vertoont. De data die bij deze trials horen zijn n.l. van dezelfde periode als de data waarop het model TM31 betrekking heeft. Dit houdt in dat de modellen TM11 en TM21, die ook over langere tijd een betrouwbaar beeld geven van de pp. T, meer specifiek zijn voor het stuurgedrag van deze pp. wat betreft de sinus-input met een periode van 24 sec. Ze komen n.l. voldoende overeen zowel met de trials 1 en 2 als met de trials 3, 4, 5 en 6, terwijl de data van de trials 1 en 2 enkele maanden eerder zijn verzameld dan de data van de laatste.

Omdat het regelgedrag van pp. T verschillend is voor de twee sinus-inputs en het niet aannemelijk is dat dit een gevolg is van een leerproces, kan men veronderstellen dat deze pp. voor de twee sinussen een verschillende strategie hanteert.

De correlatie tussen de predicties van het model JM11, resp. JM21 en de empirische gegevens van pp. T zijn vooral wat betreft de responsies ( $R \times R$ ) laag. Alleen de correlatie tussen de predictie van model JM31, dat evenals model TM31 betrekking heeft op de meest recente data, en de empirische gegevens van trial 1 t/m 6 van pp. T, zijn hoog. Dat houdt in dat model JM31 overeenkomt met de modellen TM11 en TM21. Dit wijst erop dat pp. J in de laatste fase van het onderzoek een overeenkomstig regelgedrag vertoonde als pp. T in het begin van het experiment.

-4 SINUS INPUT PERIODE 24 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. J  
 (tabel 6.5A, 6.5B, 6.5C)

Tabel: 6.5 A input: sinus periode 24 sec. Emp. data PP. J  
 Emp. data: (1, 2, 3, 4, 5, 6) Corr. matrix:  
 resp x resp.

RxR	TM11	TM21	TM31	JM11	JM21	JM31	1	2	3	4	5	6
TM11	-											
TM21	.82	-										
TM31	.69	.40	-									
JM11	.58	.72	.39	-								
JM21	.40	.58	.33	.85	-							
JM31	.88	.68	.78	.43	.34	-						
1	.48	.62	.34	.98	.86	.33	-					
2	.80	.84	.60	.84	.73	.75	.76	-				
3	.80	.74	.75	.48	.41	.81	.34	.79	-			
4	.73	.53	.82	.27	.23	.82	.17	.63	.90	-		
5	.79	.67	.63	.39	.29	.94	.26	.73	.81	.80	-	
6	.82	.69	.54	.30	.25	.86	.19	.66	.76	.76	.86	-

Tabel: 6.5 B error respons Emp. data PP. J Corr. resp x error

RxE	TM11	TM21	TM31	JM11	JM21	JM31	1	2	3	4	5	6
TM11	-.56	-.64	-.31	-.71	-.60	-.45	-.67	-.72	-.50	-.30	-.38	-.35
TM21	-.61	-.83	-.30	-.84	-.71	-.48	-.78	-.80	-.57	-.27	-.45	-.39
TM31	-.67	-.61	-.71	-.82	-.72	-.62	-.79	-.82	-.68	-.58	-.47	-.44
JM11	-.51	-.67	-.35	-.98	-.82	-.36	-.98	-.78	-.41	-.20	-.28	-.20
JM21	-.49	-.64	-.34	-.98	-.83	-.33	-.98	-.77	-.39	-.18	-.25	-.18
JM31	-.88	-.79	-.69	-.74	-.60	-.88	-.65	-.87	-.79	-.68	-.79	-.73
1	-.40	-.57	-.26	-.95	-.81	-.24	-.98	-.70	-.30	-.10	-.16	-.09
2	-.55	-.74	-.39	-.91	-.86	-.49	-.88	-.85	-.54	-.31	-.45	-.36
3	-.77	-.87	-.59	-.80	-.69	-.73	-.70	-.92	-.84	-.65	-.72	-.66
4	-.84	-.75	-.72	-.67	-.53	-.83	-.57	-.86	-.87	-.78	-.80	-.74
5	-.80	-.82	-.59	-.66	-.53	-.83	-.53	-.86	-.84	-.68	-.84	-.72
6	-.90	-.84	-.61	-.59	-.47	-.84	-.50	-.79	-.78	-.67	-.78	-.85

Tabel: 6.5 C Emp. data PP. J Corr. error x error

ExE	TM11	TM21	TM31	JM11	JM21	JM31	1	2	3	4	5	6
TM11	-											
TM21	.87	-										
TM31	.75	.73	-									
JM11	.75	.85	.83	-								
JM21	.74	.84	.83	1.00	-							
JM31	.73	.78	.85	.70	.69	-						
1	.75	.82	.79	.99	.99	.62	-					
2	.75	.91	.81	.91	.91	.79	.88	-				
3	.72	.88	.82	.76	.74	.90	.68	.89	-			
4	.68	.71	.82	.62	.59	.89	.52	.68	.89	-		
5	.70	.82	.70	.61	.58	.91	.51	.76	.93	.91	-	
6	.63	.70	.65	.53	.51	.86	.44	.63	.84	.84	.84	-

Het model JM11 is aangepast aan data van trial 1. De correlatie tussen beide variabelen voor R x R is .98, voor E x E is deze .99. Dat wil zeggen: het model vertoont een significante overeenkomst ( $p < .01$ ) met variabele 1.

Uit de vergelijking van de correlaties R x R en E x E blijkt dat de trials 1 en 2 beide afwijken van de andere trials. Evenals bij de pp. T hebben de trials 1 en 2 betrekking op de beginfase van het experiment en de trials 3, 4, 5 en 6 op de laatste fase; de amplitude van het inputsignaal van de trials 1 en 2, bedraagt 10 Volt en van de andere trials 7 Volt. De correlaties tussen de predicties van model JM11, resp. JM21 en de empirische gegevens van trial 1 en 2 zijn hoog, ze zijn lager voor de trials 3, 4, 5 en 6. Dit geldt vooral voor de correlaties van de responsies (R x R). De trials 3, 4, 5 en 6 correleren onderling hoog. Opvallend is dat de correlaties tussen de predictie van model JM31 en de empirische gegevens van trial 3, 4, 5 en 6 hoog zijn. Omdat dit model een afbeelding is van het operatorgedrag in de laatste fase van het experiment, is er uit af te leiden dat pp. J gedurende de uitvoering van het experiment een andere regelstrategie heeft toegepast. Kennelijk heeft zich bij deze pp. nog een leerproces voltrokken. Het valt bijvoorbeeld op dat de trials 3, 4, 5 en 6 ook een samenhang vertonen met de modellen TM11 en TM12, terwijl deze minder samenhangen met de trials 1 en 2.

CONCLUSIE: Bij deze pp. heeft zich een leerproces voltrokken, tengevolge waarvan zijn stuurgedrag in de laatste fase van het experiment overeenkomt met het stuurgedrag van pp. T gedurende het hele onderzoek. De regelstrategie van pp. J in de latere fase van het onderzoek is minder afhankelijk van de periode van de sinus-input als de regelstrategie van pp. T. Model JM31 dat is geverifieerd met de data van de sinus met een periode van 36 sec., correleert namelijk

ook hoog met de experimentele gegevens afkomstig van de input sinus met een periode van 24 sec. Opvallend is dat het model TM31 goed correleert met de empirische data van pp. J.

Evenals bij de stap-input blijkt dat de modellen die betrekking hebben op het regelgedrag van pp. T beter overeenkomen met het regelgedrag van pp. J dan omgekeerd. Het regelgedrag van pp. J lijkt meer specifiek. Een verklaring kan zijn dat het regelgedrag van pp. T complexer is en daarom de aspecten van het regelgedrag van pp. J insluit plus nog een aantal andere.

-5 SINUS INPUT PERIODE 36 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. T  
(tabel 6.6A, 6.6B, 6.6C) (Zie blz. 189)

Het model TM12 is aangepast aan de data van de trial 2. De correlaties voor de respons en voor de error zijn resp. .78 en .84, d.w.z. ze zijn significant ( $p < .01$ ). Uit de tabellen is af te leiden dat de correlatie tussen de predictie van model TM12 en de empirische gegevens van de trial 1 t/m 4 hoog is. Uit punt 3 was reeds gebleken dat het model TM31 een geringe overeenkomst vertoonde met de betreffende experimentele data en dat het model TM21 er beter bij past. Model TM22 heeft dezelfde structuur als de modellen TM11 en TM21 uit punt 3. Het is te verwachten dat het minder zal samenhangen met model TM12 dat structureel overeenkomt met model TM31. Dit blijkt vooral bij de correlaties tussen de responsies (zie tabel 6.6A).

Omdat de veronderstelling dat het verschil tussen beide modellen te wijten zou zijn aan een leerproces, reeds onjuist bleek te zijn bij punt 3, geven de resultaten ook hier aanleiding tot de conclusie dat de pp. T voor beide sinussen een verschillende strategie hanteert.

Het model JM12 vertoont met betrekking tot de corre-

Tabel: 6.6 A Input: sinus periode 36 sec. Emp. data PP. T Corr. resp x resp  
Emp. data: (1, 2, 3, 4)

RxR	TM12	TM22	JM12	JM22	1	2	3	4
TM12	-							
TM22	.55	-						
JM12	.50	.79	-					
JM22	.57	.89	.68	-				
1	.59	.40	.44	.30	-			
2	.80	.39	.55	.33	.53	-		
3	.77	.33	.52	.28	.58	.84	-	
4	.69	.60	.65	.38	.60	.68	.57	-

Tabel: 6.6 B error resp. Corr. resp x error

RxE	TM12	TM22	JM12	JM22	1	2	3	4
TM12	-.71	-.57	-.44	-.83	-.24	-.50	-.44	-.24
TM22	-.53	-.91	-.71	-.92	-.33	-.35	-.27	-.49
JM12	-.60	-.89	-.93	-.84	-.43	-.49	-.43	-.63
JM22	-.56	-.89	-.69	-.99	-.32	-.34	-.30	-.37
1	-.73	-.68	-.52	-.68	-.76	-.51	-.55	-.59
2	-.62	-.57	-.54	-.72	-.21	-.68	-.55	-.37
3	-.82	-.62	-.65	-.70	-.49	-.79	-.76	-.54
4	-.68	-.72	-.68	-.64	-.65	-.58	-.43	-.86

Tabel: 6.6 C Corr. error x error

ExE	TM12	TM22	JM12	JM22	1	2	3	4
TM12	-							
TM22	.69	-						
JM12	.61	.89	-					
JM22	.83	.94	.86	-				
1	.64	.72	.66	.70	-			
2	.85	.65	.60	.72	.45	-		
3	.81	.65	.67	.71	.68	.80	-	
4	.51	.74	.77	.64	.76	.50	.59	-

laties van de responsies de meeste overeenkomst met het model TM12. Daar beide betrekking hebben op data uit de laatste fase van het empirisch onderzoek, betekent dit dat het regelgedrag van pp. J convergeert naar het regelgedrag van pp. T. Dit komt overeen met de resultaten van model JM22 dat evenals model TM22 betrekking heeft op de beginfase van het onderzoek. Model JM22 wijkt namelijk het meest af van model TM12 wat betreft de correlatie tussen de responsies (zie tabel 6.6A).

-6 SINUS INPUT PERIODE 36 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. J  
 (tabel 6.7A, 6.7B, 6.7C)

Tabel: 6.7 A input: sinus periode 36 sec. Emp. data PP. J  
 Corr. resp x resp

RxR	TM12	TM22	JM12	JM22	1	2	3	4
TM12	-							
TM22	.52	-						
JM12	.50	.79	-					
JM22	.57	.89	.68	-				
1	.32	.76	.88	.55	-			
2	.51	.59	.87	.50	.72	-		
3	.19	.76	.74	.58	.87	.64	-	
4	.49	.69	.89	.51	.85	.93	.73	-

Tabel: 6.7 B error resp Corr. resp x error

RxE	TM12	TM22	JM12	JM22	1	2	3	4
TM12	-.71	-.57	-.44	-.83	-.17	-.36	-.15	-.29
TM22	-.53	-.91	-.71	-.92	-.64	-.57	-.64	-.60
JM12	-.60	-.89	-.93	-.84	-.84	-.79	-.77	-.82
JM22	-.56	-.89	-.69	-.99	-.56	-.51	-.57	-.52
1	-.47	-.85	-.88	-.75	-.90	-.72	-.82	-.78
2	-.58	-.80	-.87	-.77	-.74	-.85	-.69	-.83
3	-.39	-.77	-.66	-.78	-.67	-.51	-.68	-.55
4	-.52	-.87	-.90	-.74	-.86	-.84	-.82	-.90

Tabel: 6.7 C Corr. error x error

ExE	TM12	TM22	JM12	JM22	1	2	3	4
TM12	-							
TM22	.69	-						
JM12	.61	.89	-					
JM22	.83	.94	.86	-				
1	.45	.84	.94	.76	-			
2	.57	.83	.92	.80	.84	-		
3	.53	.81	.76	.77	.82	.61	-	
4	.49	.81	.93	.74	.92	.87	.78	-

Het model JM12 is aangepast aan de trial 1. De correlatie tussen de responsies R x R en de error E x E

zijn respectievelijk .88 en .94 ( $p < .01$ ). Het model en de trial 1 komen dus functioneel overeen. Het model blijkt ook goed overeen te komen met de andere drie trials. Zoals in punt 4 reeds werd aangetoond verschillen de modellen JM12 en JM22. Model JM12 (JM31 onder punt 4) is aangepast aan de meest recente empirische data van pp. J, model JM22 (model JM11 en JM21 onder punt 3) is aangepast aan data uit de beginfase van het onderzoek.

Omdat uit punt 4 bleek dat de verschillen tussen beide modellen het gevolg waren van een leerproces, is te verwachten dat model JM12 beter past bij de trials 1, 2, 3 en 4, die betrekking hebben op de laatste fase van het onderzoek. Uit de tabellen is af te leiden dat deze veronderstelling vooral juist is wat betreft de correlatie tussen de responsies.

Van de modellen TM12 en TM22 wijkt TM12 het meeste af, wat uit de analyse onder punt 4 reeds was gebleken. Ook hier stemmen de modellen JM12 en TM22 het meest overeen (onder punt 4 waren dit respectievelijk JM31 en TM11).

Samenvattend kunnen we stellen dat de ontwikkelde modellen goed overeen komen met de empirische data. De modellen die ontwikkeld zijn met behulp van de empirische data van pp. T passen beter bij de empirische data van pp. J, dan de modellen die gerelateerd zijn aan pp. J passen bij de empirische data van pp. T.

Dit kan mogelijk verklaard worden doordat pp. T een complexer stuurgedrag vertoont dan pp. J, ten gevolge waarvan pp. T componenten in het stuurgedrag heeft die overeenkomen met het stuurgedrag van pp. J, terwijl dit omgekeerd in geringere mate het geval is. Bij pp. J is het veronderstellen van een leerproces, gedurende de uitvoering van het experiment, plausibel.

Wanneer de beide modellen met betrekking tot de



sinus-input (zie tabel 6.1, model M21 en M31) gere- lateerd worden aan de empirische data, voor een input-sinus met een periode van 24 sec., dan blijkt het model M21 meer samen te hangen met de data uit de beginfase van het experiment en het model M31 met de data uit de laatste fase van het experiment (tri- als 1, 2 resp. 3, 4, 5, 6). Dezelfde tijdsfactor zit ook in de modellen; model M21 komt overeen met data uit de beginfase en model M31 met data uit de eind- fase van het onderzoek.

Deze tijdsfactor speelt bij pp. T 'n geringe rol. Het model TM21 komt ook significant overeen met de empi- rische data uit de latere fase van het experiment. Het model TM31 vertoont minder overeenkomst met deze data (zie de tabellen 6.4A, 6.4B, 6.4C). Dit leidt tot de conclusie dat pp. T voor beide sinussen een ander regelgedrag vertoont.

In het algemeen geldt dat de correlaties tussen respons en error ( $R \times E$ ) bij pp. J hoger zijn dan bij pp. T. Dit betekent dat pp. J meer let op de meter- stand dan pp. T die waarschijnlijk meer de input van het proces tracht te schatten en aldus de traagheid van het derde-orde filter tracht te compenseren (we zullen er nog bij de bespreking van de modelstructuur op terugkomen).

Dit onderscheid tussen beide ppn. is interessant omdat het overeenkomst vertoont met twee types van operatorgedrag. In de procesindustrie hoort men vaak dat operators grofweg worden onderverdeeld in paneel- bestuurders en model-bestuurders. De paneel-bestuur- der let voornamelijk op datgene wat op het bedienings- paneel is af te lezen, en stuurt dienovereenkomstig bij. De model-bestuurder stuurt op basis van het model dat hij heeft van het proces.

Overeenkomstig dit onderscheid lijkt pp. T meer op een model-bestuurder en pp. J meer op 'n paneel-bestuur- der.

Welke konsekwenties dit heeft voor de kwaliteit van het regelgedrag zal blijken bij de bespreking van het simulatiemodel.

Aan de hand van de voorgaande analyse zullen we een specifiek model uitkiezen voor een gedetailleerde beschrijving. Van de andere modellen zullen we alleen de "listing" geven, d.w.z. een lijst van vergelijkingen die inzicht geven in de regelstrategie (zie bijlagen 1 t/m 5).

Vervolgens zullen we met behulp van de structuur van de modellen de verschillen analyseren tussen de typen regelgedrag.

Omdat het model TM11 het beste past bij de empirische data van beide ppn. zullen we het meer gedetailleerd beschrijven.

HOOFDSTUK VII

## DE BESCHRIJVING VAN EEN REGELSTRATEGIE

7.1 Inleiding

In het vorige hoofdstuk hebben we aangetoond dat de verschillende simulatiemodellen betrouwbaar zijn, zonder weer te geven welke de structuur is van al deze modellen. Omdat een uitgebreide analyse van de structuur van alle zes modellen een omvangrijk werk is, hebben we besloten een specifiek model uit te kiezen voor de beschrijving van een regelstrategie. De lezer zal dan aan de hand van dit voorbeeld in staat zijn de andere regelstrategieën te bestuderen, waarvan in bijlagen 1 t/m 5 een opsomming te vinden is. Omdat het model dat betrekking heeft op pp. T (TM11) het meest algemeen van toepassing bleek, zullen we van dit model de regelstrategie beschrijven.

7.2 Beschrijving regelstrategie

Uit de analyse van de computer runs bleek dat het nodig was een onderscheid te maken tussen een regelstrategie voor een toenemende en afnemende error.

DECRUL1.K = CLIP (DECRP1.K, DECRN1.K, CERR1.K, 0)

3.1,A

DECRUL1 - DECISION RULE 1 (SCALE UNITS)  
 DECRP1 - DECISION RULE FOR INCREASING ERROR 1  
 (SCALE UNITS)  
 DECRN1 - DECISION RULE FOR DECREASING ERROR 1  
 (SCALE UNITS)  
 CERR1 - CHANGE OF ERROR 1 (SCALE UNITS)

Het bleek voor een betrouwbare nabootsing van de em-

pirische gegevens nodig te zijn de beslissingsregel voor een toenemende en afnemende error als volgt vast te stellen.

### 7.2.1 De beslissingsregel voor een toenemende en afnemende error

Uit de analyse van de runs bleek dat wanneer de snelheid van de fout beneden een drempelwaarde DTHP1 kwam, de pp. proportioneel bijstuurde (ACTION1: zie verg. 3.6,A). Werd deze drempel overschreden, dan bleek het nodig een differentiërende component in de beslissingsregel toe te voegen. Boven deze drempel, die de snelheid van de fout weergeeft, reageert de pp. als een proportionele differentiële regelaar (ACT1B: zie verg. 3.8,A).

Wanneer de snelheid van de fout een tweede drempel PDTH1 overschrijdt dan blijkt dat het model het beste het operatorgedrag weergeeft wanneer hij slechts reageert als 'n differentiële regelaar (ACT1A: zie verg. 3.7,A). Afhankelijk dus van de snelheid waarmee de fout toeneemt, reageert de operator eerst als een proportionele regelaar, daarna als een proportionele en differentiële regelaar en tenslotte als een differentiële regelaar.

De verschillende drempels bleken afhankelijk te zijn van het groter of kleiner worden van de error, d.w.z. of de wijzer van de middenstand wegliep of er weer naar terugkeerde. Het bleek niet mogelijk deze drempels gedurende de hele trial als constant te beschouwen. Op een zeker niveau van de taak-stress was het nodig veel nauwere grenzen te maken voor het switchen van de ene regelstrategie naar de andere. De regelstrategie voor toenemende error kunnen we als volgt schematisch weergeven:

## CERR1

	boven DTHP1	onder DTHP1
boven PDTH1	(G31)(CERR1)	---

## CERR1

onder	(G31)(CERR1)	(G21)(ERROR1)
	+	
PDTH1	(G21)(ERROR1)	

$$\text{Voor DTHP1} = \begin{cases} .02 & \text{TS1} \geq .95 \\ .07 & \text{TS1} < .95 \end{cases}$$

$$\text{en voor PDTH1} = \begin{cases} .20 & \text{TS1} \geq .95 \\ .32 & \text{TS1} < .95 \end{cases}$$

De vergelijkingen die op deze strategie betrekking hebben zien er als volgt uit.

De beslissingsregel bij toenemende error:

$$\text{DECRP1.K} = \text{CLIP} (\text{ACTP11.K}, \text{ACTION1.K}, \text{CERR1.K}, \text{DTHP1.K})$$

3.2,A

DECRP1 - DECISION RULE FOR INCREASING ERROR 1  
(SCALE UNITS)

ACTP11 - ACTION 11 RULE FOR INCREASING ERROR  
(SCALE UNITS)

ACTION1 - ACTION 1 (PROPORTIONAL CONTROL)  
(SCALE UNITS)

DTHP1 - DECISION THRESHOLD 1 FOR INCREASING ERROR  
(SCALE UNITS)

CERR1 - CHANGE OF ERROR 1  
(SCALE UNITS)

DTHP1.K = CLIP (.02, .07, TS1.K, .95)                      3.3,A  
DTHP1 - DECISION THRESHOLD 1 FOR INCREASING ERROR  
  (SCALE UNITS)  
TS1 - TASK STRESS 1                      (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

ACTP11.K= CLIP (ACT1A.K, ACT1B.K, CERR1.K, PDTH1.K)  
3.4, A

ACTP11 - ACTION 11 FOR INCREASING ERROR  
(SCALE UNITS)

ACT1A - ACTION 1 A (SCALE UNITS)

ACT1B - ACTION 1 B (SCALE UNITS)

CERR1 - CHANGE OF ERROR 1 (SCALE UNITS)

PDTH1 - POSITIVE DECISION THRESHOLD 1  
(SCALE UNITS)

PDTH1.K = CLIP (.20, .32, TS1.K, .95) 3.5,A  
 PDTH1 - POSITIVE DECISION THRESHOLD 1  
 (SCALE UNITS)  
 TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

Wanneer de taakstress groter wordt dan .95 "switcht" de drempel van .32 naar .20.

<b>ACTION1.K</b>	<b>= (G21.K)(ERROR1.K)</b>	<b>3.6, A</b>
<b>ACTION 1</b>	<b>(SCALE UNITS)</b>	
<b>G21 - GAIN 21</b>	<b>(DIMENSIONLESS)</b>	
<b>ERROR1</b>	<b>(SCALE UNITS)</b>	

```

ACT1A.K = (G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)          3.7,A
  ACT1A - ACTION 1 A          (SCALE UNITS)
  G31 - GAIN 31                (DIMENSIONLESS)
  CERR1 - CHANGE OF ERROR 1 (SCALE UNITS)
  SIGN1 -                      (DIMENSIONLESS)

```

$$\text{ACT1B.K} = (\text{G21.K})(\text{ERROR1.K}) + (\text{G31.K})(\text{CERR1.K})(\text{SIGN1.K})$$

3.8,A

ACT1B - ACTION 1 B                      (SCALE UNITS)

```
SIGN1.K = CLIP (NEG, POS, ISVAR1.K, 0)      3.9,A
NEG = - 1                                   3.10,C
POS = + 1                                   3.11,C
```

SIGN1 - (DIMENSIONLESS)  
 NEG - NEGATIVE  
 POS - POSITIVE  
 ISVAR1 - INDICATED STATE VARIABLE 1 (SCALE UNITS)

Op overeenkomstige wijze kunnen we de beslissingsregel bij een afnemende error als volgt schematisch weergeven:

ACERR1

	boven DTHN1	onder DTHN1
boven NDTH1	(G31)(CERR1)	---

ACERR1

onder	(G31)(CERR1)	(G21)(ERROR1)
	+	
NDTH1	(G21)(ERROR1)	

Voor DTHN1 =  $\begin{cases} .02 & TS1 \geq .95 \\ .17 & TS1 < .95 \end{cases}$

en voor NDTH1 =  $\begin{cases} .02 & TS \geq .95 \\ .33 & TS < .95 \end{cases}$

De vergelijkingen zien er als volgt uit.  
 De beslissingsregel bij een afnemende error:

DECRN1.K = CLIP (ACTN11.K, ACTION1.K, ACERR1.K, DTHN1.K)

DECRN1 - DECISION RULE FOR DECREASING ERROR 1  
 (SCALE UNITS)

ACTN11 - ACTION 11 FOR DECREASING ERROR 1  
 (SCALE UNITS)

ACTION1 - (SCALE UNITS)  
 ACERR1 - ABSOLUTE VALUE OF CERR 1 (SCALE UNITS)  
 DTHN1 - DECISION THRESHOLD 1 FOR DECREASING ERROR  
 (SCALE UNITS)

ACERR1.K = MAX (CERR1.K, - CERR1.K) 3.13,A  
 ACERR1 - ABSOLUTE VALUE OF CERR1  
 (SCALE UNITS)  
 CERR1 - CHANGE OF ERROR 1 (SCALE UNITS)

DTHN1.K = CLIP (.02, .17, TS1.K, .95) 3.14,A  
 DTHN1 - DECISION THRESHOLD FOR DECREASING ERROR 1  
 (SCALE UNITS)  
 TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

ACTN11.K = CLIP (ACT1A.K, ACT1B.K, ACERR1.K, NDTH1.K) 3.15,A

ACTN11 - ACTION 11 FOR DECREASING ERROR  
 (SCALE UNITS)  
 ACT1A - (SCALE UNITS)  
 ACT1B - (SCALE UNITS)  
 ACERR1.K - ABSOLUTE VALUE OF CERR 1  
 (SCALE UNITS)  
 NDTH1 - NEGATIVE DECISION THRESHOLD 1  
 (SCALE UNITS)

NDTH1.K = CLIP (.02, .33, TS1.K, .95) 3.16,A  
 NDTH1 - NEGATIVE DECISION THRESHOLD 1  
 (SCALE UNITS)  
 TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

Voor ACT1A, ACT1B en ACTION1, zie resp. vergelijking  
 3.7; 3.8; 3.6.

De signaal-stroomdiagrammen voor beide beslissings-  
 regels zien er als volgt uit: zie fig. 7.1 en 7.2.  
 (Zie blz. 200 en 201.)



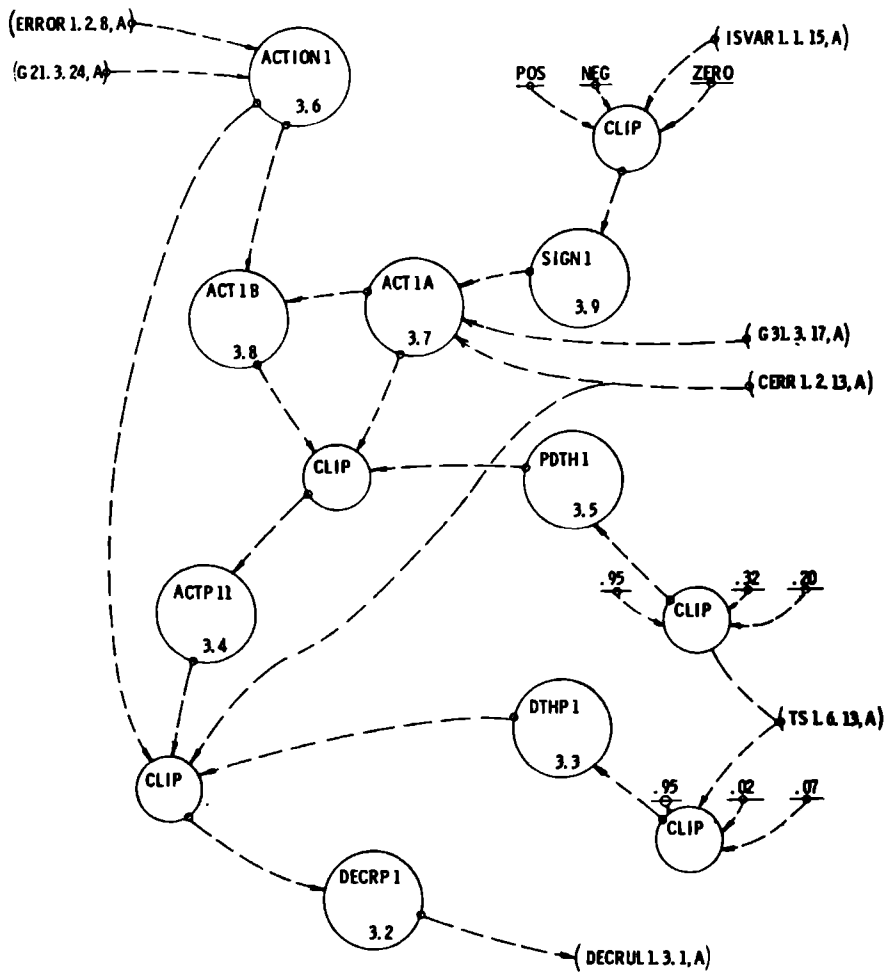


FIG. 7.1

STROONDIAGRAM VAN BESLISSINGSREGEL VOOR TOENEMENDE ERROR



Uit de vergelijkingen met de variabelen ACTION1, ACT1A en ACT1B is af te leiden dat de factoren G21 en G31 ook variabelen zijn. We hebben reeds in hoofdstuk V opgemerkt dat we aannemen dat deze factoren afhankelijk zijn van de taak-stress (TS1). Door in het simulatiemodel onderscheid te maken tussen een toenemende en een afnemende error is het mogelijk gebleken de data te reproduceren. We veronderstellen daarom dat het voor de pp. verschil uitmaakt of de error toe- of afneemt. We hebben de waarden van G21 en G31 afzonderlijk bepaald voor beide condities van de error. G31, het gewicht dat wordt toegekend aan de verandering van error, wordt als volgt bepaald:

```

G31.K = CLIP (CRM1.K, RM1, TS1.K, .3)          3.17,A
G31 - GAIN OF CERR 1      (DIMENSIONLESS)
CRM1 - CHANGE RATE MEASURE 1 (DIMENSIONLESS)
RM1 - RATE MEASURE 1      (DIMENSIONLESS)
TS1 - TASK STRESS 1      (SCALE UNITS2)

```

RM1 = 8 3.18.C

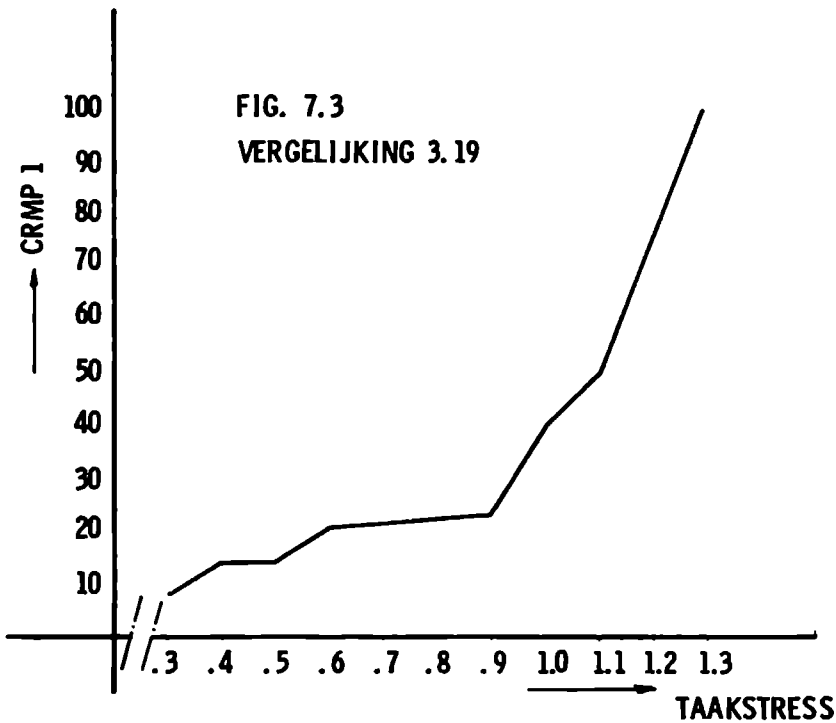
```
CRM1.K = CLIP (CRMP1.K, CRMN1.K, CERR1.K, 0) 3.19,A
  CRM1 - CHANGE RATE MEASURE 1 (DIMENSIONLESS)
  CRMP1 - CHANGE RATE MEASURE POSITIVE 1
              (i.e. INCREASING ERROR)
              (DIMENSIONLESS)
  CRMN1 - CHANGE RATE MEASURE NEGATIVE 1
              (i.e. DECREASING ERROR)
              (DIMENSIONLESS)
  CERR1 - CHANGE OF ERROR 1 (SCALE UNITS)
```

```
CRMP1.K = TABHL (CP1TAB, TS1.K, .3, 1.3, .1) 3.20,A
CP1TAB* = 8/14/14/20.8/21.5/22.3/23.5/40/50/75/100
                                           3.21,T
```

CRMP1 - CHANGE RATE MEASURE POSITIVE 1  
(DIMENSIONLESS)  
CP1TAB - CHANGE RATE MEASURE POSITIVE TABLE  
TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

Het gewicht dat aan de verandering van de error bij

toenemende error wordt toegekend wordt groter naarmate de taak-stress toeneemt. (Zie fig. 7.3).



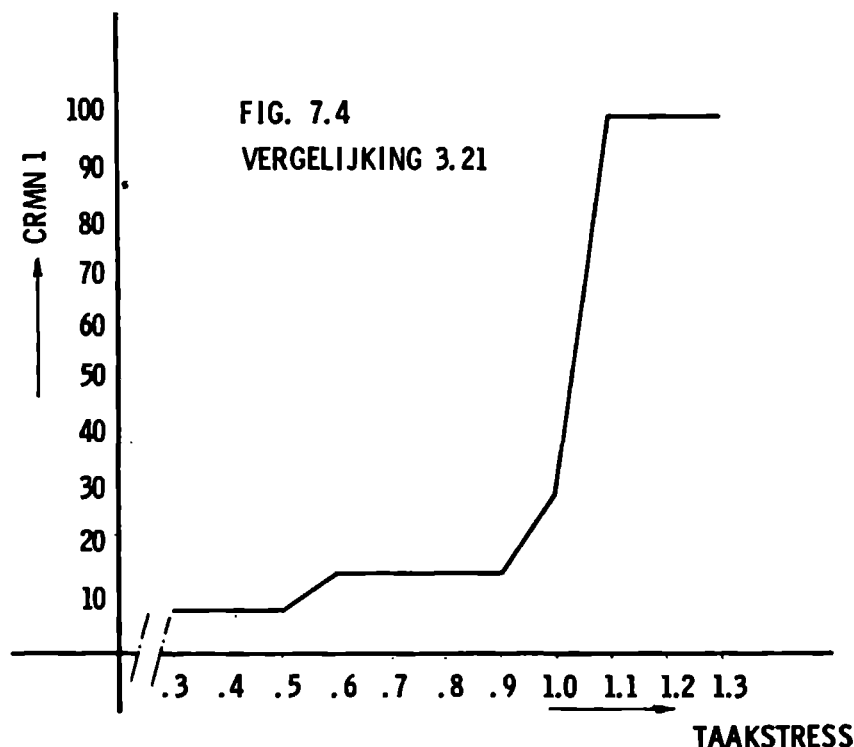
Het gewicht dat wordt toegekend aan de verandering van error bij een afnemende fout wordt als volgt vastgesteld:

```

CRMN1.K = TABHL (CN1TAB, TS1.K, .3, 1.3, .1) 3.22,A
CN1TAB* = 8/8/8/15/15/15/15/30/100/100/100 3.23,T
  CRMN1 - CHANGE RATE MEASURE NEGATIVE 1(DIMENSIONLESS)
  CN1TAB* - CHANGE RATE MEASURE NEGATIVE TABLE
  TS1 - TASK STRESS 1      (SCALE UNITS2)
  
```

Naarmate de taak-stress toeneemt, neemt ook het ge-

wicht toe dat aan de differentiërende component wordt toegekend (zie fig. 7.4).



Het signaal-stroomdiagram (zie fig. 7.5 op blz. 205) geeft een beeld hoe de variabelen met betrekking tot G31 samenhangen. G21, het gewicht dat wordt toegekend aan de proportionele component is op de volgende manier afhankelijk van de taak-stress.

$$G21.K = \text{CLIP} (G21P.K, G21N.K, CERR1.K, GTH1.K)$$

3.24, A

G21 - GAIN OF PROPORTIONAL COMPONENT (DIMENSIONLESS)

G21P - GAIN OF PROPORTIONAL COMPONENT FOR INCREASING  
ERROR (DIMENSIONLESS)

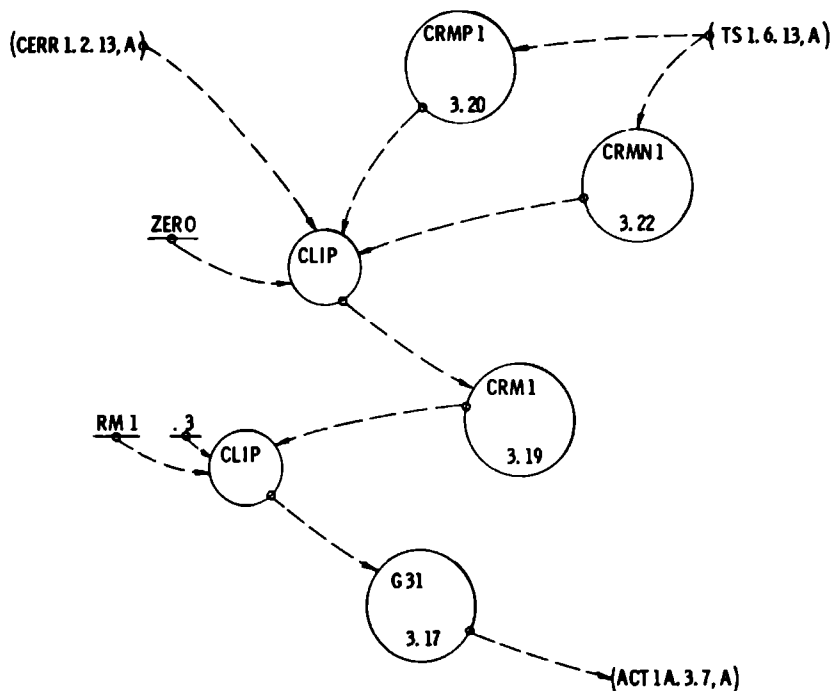


FIG. 7.5

STROOMDIAGRAM VAN HET GEWICHT TOEGEKEND AAN VERANDERING VAN ERROR

G21N - GAIN OF PROPORTIONAL COMPONENT FOR  
DECREASING ERROR (DIMENSIONLESS)

CERR1 - CHANGE OF ERROR 1 (SCALE UNITS)

GTH1 - GAIN THRESHOLD 1 (SCALE UNITS)

GTH1.K = CLIP (-.03, -.20, TS1.K, .95) 3.25,A

GTH1 - GAIN THRESHOLD 1 (SCALE UNITS)

TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

Uit vergelijking 3.24 blijkt dat de drempel voor het overspringen van de weegfactor voor toenemende en afnemende error afhankelijk is van de taak-stress. Bij toenemende taak-stress zal de drempel plotseling

veel minder worden. Dit betekent dat deze operator in dat geval eerder zal overstappen op een andere strategie wanneer de error begint af te nemen. Waaruit die andere strategie bestaat zal blijken uit de volgende vergelijkingen.

$$\begin{aligned} G21P.K &= \text{TABHL} (S21PTAB, TS1.K, .3, 1.3, .1) \quad 3.26, A \\ S21PTAB* &= 1/1.8/1.8/2.6/4.5/4.5/4.5/5/5.4/5.6/6 \quad 3.27, T \end{aligned}$$

G21P - GAIN COMPONENT FOR INCREASING ERROR  
(DIMENSIONLESS)

S21PTAB - STRESS TABLE FOR INCREASING ERROR

TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

$$\begin{aligned} G21N.K &= \text{TABHL} (S21NTAB, TS1.K, .3, 1.3, .1) \quad 3.28, A \\ S21NTAB* &= 1.5/1.5/1.5/3/0/0/0/0/0/0/0 \quad 3.29, T \end{aligned}$$

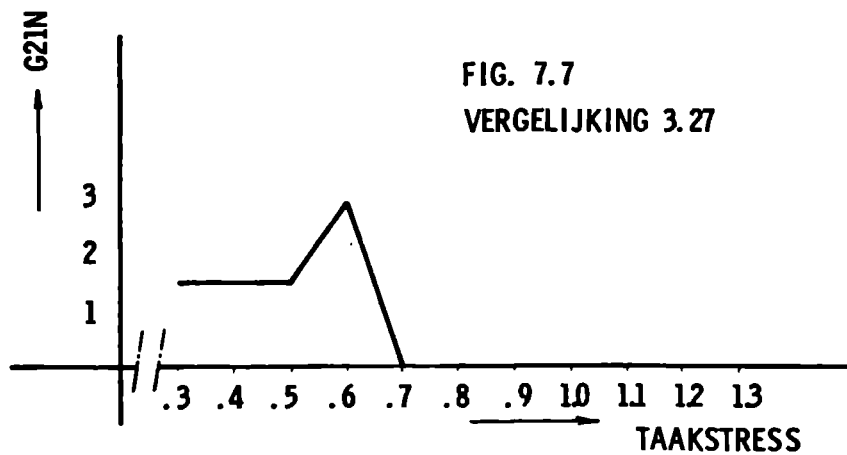
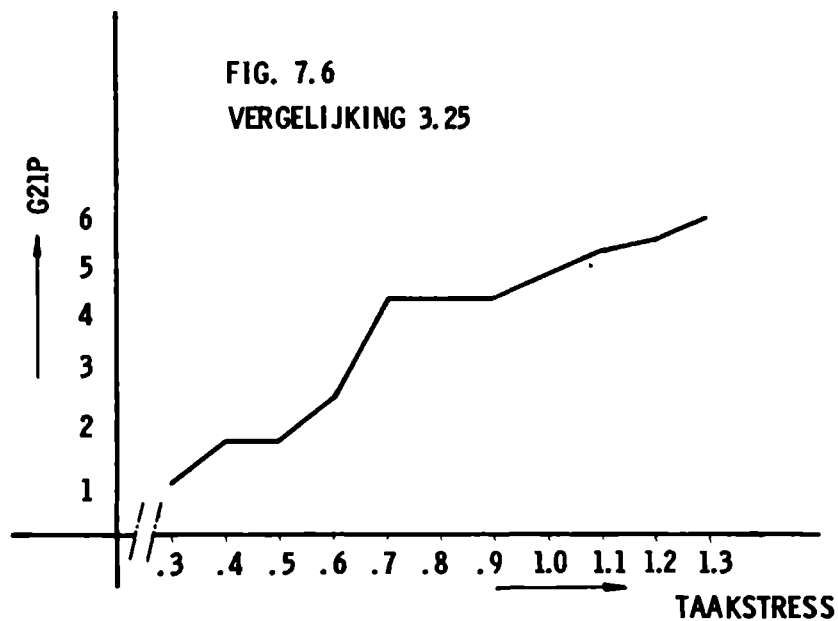
G21N - GAIN COMPONENT FOR INCREASING ERROR  
(DIMENSIONLESS)

S21NTAB - STRESS TABLE FOR DECREASING ERROR

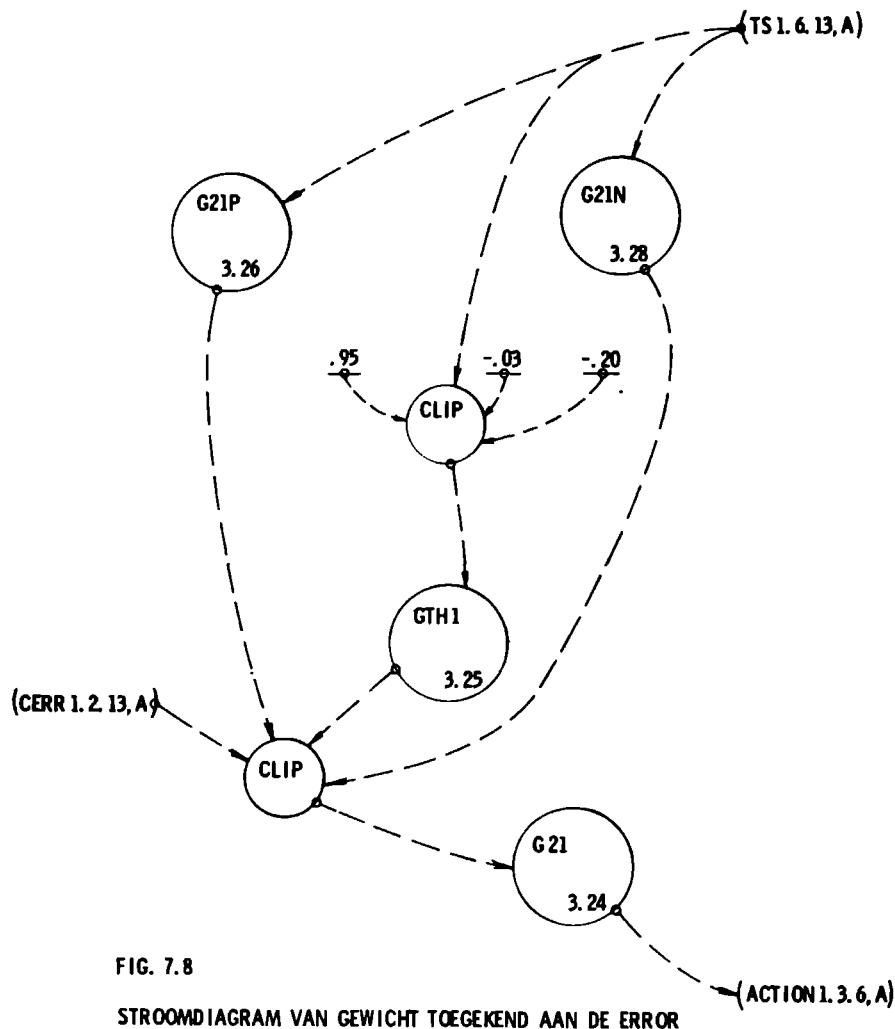
TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

Uit de vergelijkingen 3.26, 3.27, 3.28 en 3.29 en uit de grafieken (zie fig. 7.6 en 7.7 op blz. 207) is af te leiden dat bij toenemende taak-stress het gewicht dat samenhangt met een toenemende error, toeneemt. Het gewicht dat samenhangt met een afnemende error blijft enige tijd constant, neemt even toe en wordt daarna nul, bij toenemende error. Dit betekent dat de proportionele factor in de besturing bij afnemende error verdwijnt. Omdat in dat geval alleen de differentiërende factor overblijft, leidt dit tot de conclusie dat de operator in deze fase bezig is te prediceren (zie hoofdstuk V).

Fig. 7.8 op blz. 208 illustreert de samenhang tussen de G21 variabelen. Uit de vergelijkingen voor de versterkingsfactor voor de proportionele en differentiële component is af te leiden dat de operator de volgende strategie hanteert. Wanneer de error toe-







neemt, geeft hij bij toenemende taak-stress steeds meer tegenstuur om het weglopen van de wijzer tegen te gaan. Nadat de wijzer de maximale stand heeft bereikt en weer begint terug te lopen naar zijn middenstand, moet de operator zoveel mogelijk voorkomen dat de wijzer over die middenstand heen schiet. Dit

houdt in dat hij dan vooral stuurt op de informatie over de verandering van error. Op het moment echter dat hij gaat functioneren als een differentiële regelaar, is het nodig dat de operator het effect van zijn snelle responsies kan controleren. Dit betekent dat hij de knop enige tijd een bepaalde waarde laat houden en het effect van de handeling afwacht. Deze operator vertoont op dat moment een stuurgedrag dat wordt gekenmerkt door snelle responsies, gevolgd door trage responsies. Dit predicerende en vervolgens afwachtende gedrag is als volgt verwerkt in de respons van de operator.

In Hoofdstuk V hebben we reeds aangegeven hoe de genomen beslissing wordt omgezet in een respons, die op zijn beurt wordt ingevoerd in het te besturen proces (zie vergelijkingen sectie 4 in 't model). Om de bovenstaande beschrijving te kunnen weergeven hebben we de respons van de operator als volgt aangepast.

Vergelijking 4.5,A wordt:

FRESP1.K = CLIP (RANGE1.K, RESP1.K, ARESP1.K, 10)  
4.5,A  
 FRESP1 - FACTUAL RESPONSE 1 (SCALE UNITS)  
 RANGE1 - SCALE RANGE OF OPERATOR OUTPUT 1  
(SCALE UNITS)  
 RESP1 - RESPONSE 1 OF OPERATOR (SCALE UNITS)  
 ARESP1 - ABSOLUTE VALUE OF RESPONSE 1  
(SCALE UNITS)

Wanneer de error toeneemt en de wijzer wegloopt van zijn middenstand zal de operator snel bijsturen (FRESP1). Begint de wijzer terug te lopen naar de middenstand dan zal hij steeds sneller bijsturen om te voorkomen dat de wijzer weer over die middenstand heen schiet. Wanneer dit lukt zal de operator het tegenstuur moeten vasthouden en langzaam en gradu-eel moeten bijsturen (DRESP1). De snelheid waarmee tegengestuurd wordt is afhankelijk van de taak-stress.

Dit is als volgt geprogrammeerd.

PRESP1.K = CLIP (FRESP1.K, DRESP1.K, CERR1.K, 0) 4.7,A

PRESP1 - PERCEIVED RESPONSE 1 (SCALE UNITS)  
DRESP1 - DELAYED RESPONSE 1 (SCALE UNITS)

DRESP1.K = CLIP (SRESP1.K, FRESP1.K, TS1.K, .95) 4.8,A

SRESP1 - SMOOTHED RESPONSE 1 (SCALE UNITS)  
TS1 - TASK STRESS 1 (SCALE UNITS<sup>2</sup>)

SRESP1.K = CLIP (SARESP1.K, SBRESP1.K, TS1.K, 1.2) 4.9,A

SARESP1 - SMOOTHED RESPONSE A 1 (SCALE UNITS)  
SBRESP1 - SMOOTHED RESPONSE B 1 (SCALE UNITS)

Wanneer de taak-stress verder is toegenomen en groter is dan 1.2, is het nodig een tweede filter te introduceren om het operatorgedrag na te bootsen.

SBRESP1.K = SMOOTH (FRESP1, SRT1.K) 4.10,A  
SBRESP1 - SMOOTHED RESPONSE B 1 (SCALE UNITS)  
SRT1 - SMOOTHING RESPONSE TIME 1 (TIME)

Deze SRT1 is afhankelijk van de absolute grootte van de verandering van de error. Loopt de wijzer snel terug dan zal de respons ook snel worden uitgevoerd, loopt de wijzer langzaam terug naar de middenstand dan zal ook de respons langzaam worden aangepast.

SRT1.K = CLIP (6, 45, ACERR1.K, .07) 4.11,A  
ACERR1 - ABSOLUTE VALUE OF CHANGE OF ERROR 1  
(SCALE UNITS)

SARESP1.K = SMOOTH (SBRESP1.K, SRT11.K) 4.12,A  
SRT11 - SMOOTHING RESPONSE TIME FOR SECOND FILTER  
(TIME)

SRT11.K = CLIP (4, 20, ACERR1.K, .02) 4.13,A

Zie voor de illustratie van de respons van de operator het signaal-stroomdiagram (fig. 7.9).

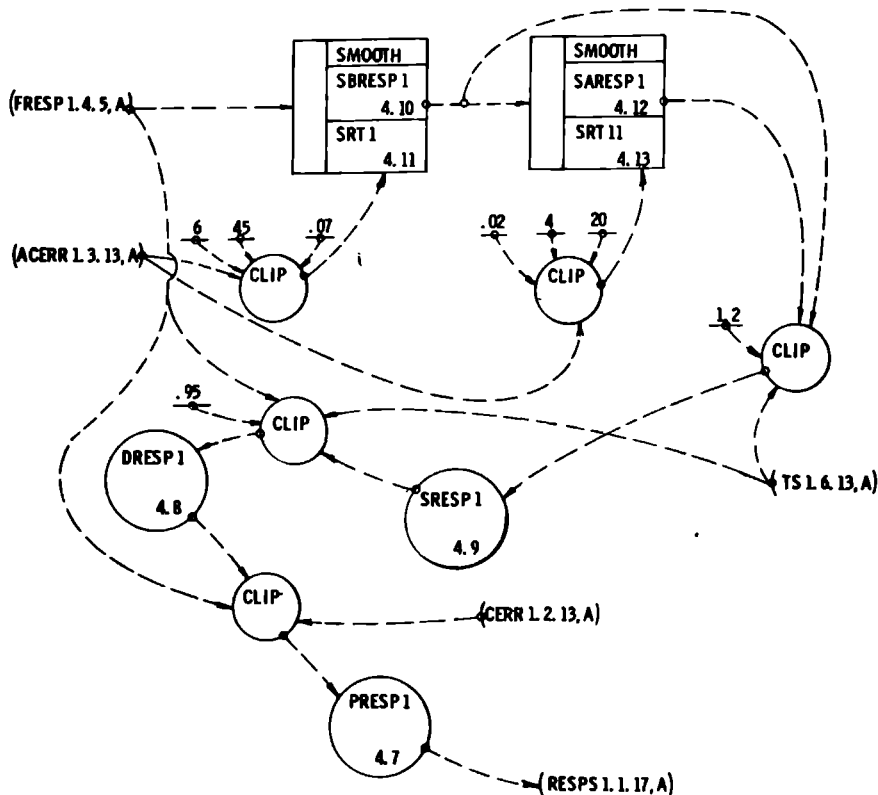


FIG. 7.9 STROOMDIAGRAM VAN DE RESPONS

Om een indruk te geven van het stuurgedrag van de operator zullen we zowel experimentele als model data vermelden. De model data hebben betrekking op trial 1. De experimentele gegevens van trial 2 worden er bij gevoegd om een indruk te geven van de overeenkomst en de variabiliteit in het stuurgedrag van pp. T (zie tabel 7.1). Tevens hebben we een plot van de output

abel 7.1 Tijdsreefs van model output TM 11 en Experimentele  
DATA van variabelen 1 en 2.

ijd in sec.	ERROR			RESPONS			Taak-stress
	TM 11	1	2	TM 11	1	2	
0	.00	.00	.00	.00	.00	.00	.30
1.6	.01	.04	.00	.00	-.04	.00	.30
3.2	.09	.04	.12	.00	-.04	-.04	.30
4.8	.38	.35	.35	.00	-.04	-4.61	.30
6.4	.94	1.13	.74	-2.26	-1.84	-9.96	.32
8.0	1.71	1.68	1.21	-4.70	-5.39	-10.04	.37
9.6	2.50	2.46	1.52	-6.98	-7.07	-9.96	.47
11.2	3.06	3.01	1.52	-9.49	-9.06	-10.04	.58
12.8	3.19	3.05	1.21	-10.00	-10.00	-.12	.63
14.4	2.72	2.54	.66	-10.00	-9.57	2.58	.67
16.0	1.64	1.68	.12	4.25	-.74	6.45	.80
17.6	.31	.43	-.43	5.01	5.66	7.54	.88
19.2	-.92	-.70	-.70	10.00	9.92	8.32	.91
20.8	-1.84	-1.80	-.98	8.11	9.96	9.10	.99
22.4	-2.37	-2.50	-1.13	10.00	10.04	9.37	1.07
24.0	-2.46	-2.38	-1.05	9.97	9.88	10.04	1.10
25.6	-2.11	-2.15	-.94	-2.35	-3.01	-2.54	1.12
27.2	-1.45	-1.76	-.43	-9.59	-6.60	-4.80	1.19
28.8	-.92	-1.21	-.16	-9.93	-8.63	-7.11	1.23
30.4	-.64	-.82	.20	-9.30	-9.26	-7.50	1.25
32.0	-.50	-.51	.27	-7.97	-9.26	-8.32	1.25
33.6	-.39	-.35	.51	-6.46	-6.91	-10.04	1.25
35.2	-.22	-.20	.70	-5.49	-6.60	-9.57	1.25
36.8	-.05	-.12	.66	-5.14	-3.16	-3.32	1.25
38.4	.02	-.04	.31	-.38	-2.93	1.95	1.25
40.0	-.09	-.04	.00	3.05	-1.76	7.07	1.25
41.6	-.37	-.59	-.20	8.39	7.93	9.02	1.25
43.2	-.68	-.90	-.27	10.00	9.96	9.10	1.26
44.8	-.89	-1.33	-.20	9.65	10.04	5.66	1.27
46.4	-.98	-1.45	-.35	6.30	10.00	3.09	1.28
48.0	-.99	-1.48	-.47	5.89	9.41	3.67	1.28
49.6	-.93	-1.17	-.59	8.31	1.68	6.95	1.28
51.2	-.63	-.59	-.74	3.13	-2.54	6.84	1.28
52.8	-.07	-.51	-.59	-8.58	-4.45	.86	1.30
54.4	.47	.04	.08	-10.00	-10.04	-7.38	1.30
56.0	.79	-.04	.59	-10.00	-9.96	-9.96	1.32
57.6	.90	.20	1.21	-7.88	-10.04	-9.88	1.33
59.2	.93	.16	1.48	-5.53	-8.55	-10.04	1.33
60.8	.96	.12	1.76	-5.72	-5.04	-9.96	1.33
62.4	.96	.00	1.21	-7.96	1.56	1.37	1.33
64.0	.75	-.12	.98	-5.99	2.85	8.55	1.33
65.6	.21	-.08	.66	6.90	9.96	9.10	1.34
67.2	-.49	.04	.70	10.00	9.96	9.02	1.35
68.8	-1.01	.08	.74	10.00	9.37	4.30	1.38
70.4	-1.29	.27	.78	10.00	-9.96	2.58	1.40
72.0	-1.37	-.12	.27	8.51	-6.91	1.56	1.41
73.6	-1.25	-.98	-.27	9.25	9.88	1.64	1.41

van het model (zie fig. 7.10 op blz. 216). Deze gegevens zijn gesampled met 'n tijdsinterval van 1.6 sec.

### 7.3 Beschrijving van het stuurgedrag met behulp van de output van het simulatiemodel

Het model TM11 is aangepast aan de data van trial 1. De vergelijking van de tijdreeksen van de model output en de data van trial 1 (zie tabel 7.1 op blz. 212) toont een redelijke overeenkomst tussen beide, zowel wat betreft de error als de respons.

Het model en de trial 1 wijken enigszins van elkaar af op het einde van de trial wat betreft de error en de respons. Dit verschil wordt veroorzaakt door de snellere respons van het model bij het weglopen van de wijzer na 40 sec. Het gevolg is dat de error minder groot wordt op tijdstip  $T = 48$  en sneller wordt teruggestuurd om vervolgens weg te lopen in de andere richting (vanaf tijdstip  $T = 54.4$  sec.). Bij trial 1 wordt dit over het doel heen schieten in de andere richting eerder geanticipeerd en dienovereenkomstig is de respons reeds negatief op  $T = 51.2$ , terwijl de model respons nog positief is op dat moment. Dit betekent dat voor het model de error doorschiet naar de andere richting tot .96 Volt op  $T = 62.4$ , terwijl deze weinig doorschiet bij trial 1.

In het model blijft het slingerpatroon van de error meer gehandhaafd, bij trial 1 wordt dit zo nu en dan doorbroken ten gevolge van snelle wisselingen in de respons. De negatieve respons bij trial 1 op  $T = 70.4$  en 72.0 sec. geeft de indruk dat de pp. verwacht dat de error zal toenemen naar het positieve gebied van de schaal. Wanneer dit onjuist blijkt te zijn, draait hij snel de knop de andere richting uit.

De respons van trial 2 begint eerder en wordt sneller maximaal dan bij de model output en de trial 1. Door deze fellere responsies blijft de error gemiddeld kleiner, maar wordt ook wat meer overstuurd na

T = 30.4. De responsie op deze oversturing bij trial 2 is sneller bij het model (zie respons op T = 38.4 voor model en trial 2). Het gevolg is dat de error van trial 2 minder groot wordt dan de error van het model, maar wel vervolgens doorschiet naar het positieve schaalgebied. Uit de tabel 7.1 is naar aanleiding van deze beschrijving af te leiden dat het modelgedrag tussen het vertoonde gedrag van trial 1 en 2 zal liggen. Ter nadere informatie geven we nogmaals de correlatie-coëfficiënten tussen de model output en de output van de beide trials: zie tabel 7.2.

Tabel 7.2

Product-moment correlaties	
I	Voor de respons:
	TM11 x TRIAL 1 .80
	TM11 x TRIAL 2 .76
	TRIAL 1 x TRIAL 2 .73
II	Voor de error:
	TM11 x TRIAL 1 .93
	TM11 x TRIAL 2 .75
	TRIAL 1 x TRIAL 2 .74
III	Voor de respons x error:
	respons x error:
	TM11 x TM11 -.56
	TM11 x TRIAL 1 -.41
	TM11 x TRIAL 2 -.51
	TRIAL 1 x TM11 -.46
	TRIAL 1 x TRIAL 1 -.49
	TRIAL 1 x TRIAL 2 -.52
	TRIAL 2 x TM11 -.35
	TRIAL 2 x TRIAL 1 -.30
	TRIAL 2 x TRIAL 2 -.51

Opvallend is dat zowel voor het model als voor de beide trials het tijdstip  $T = 25.6$  sec. samenhangt met een gewijzigde regelstrategie ( $TS1 > .95$ ). Terwijl de meterstand nog  $-2.11$  Volt is, is de respons reeds in het negatieve gebied om zo vroeg als mogelijk het verminderen van de fout op te vangen en te voorkomen dat de wijzer doorschiet in de andere richting. Uit de grootte en het verloop van de error vanaf  $T = 25.6$  blijkt dit vooral op te gaan voor het model en de trial 1. We hebben in de vorige paragraaf reeds opgemerkt dat dit regelgedrag te maken heeft met een respons die voornamelijk gebaseerd is op de differentiële component. Daarnaast moeten in de uitvoering van deze regelstrategie vertragingen filters zorgen dat het effect van deze snelle handelingen wordt vastgehouden, door het langzaam terugdraaien van de regelknop.

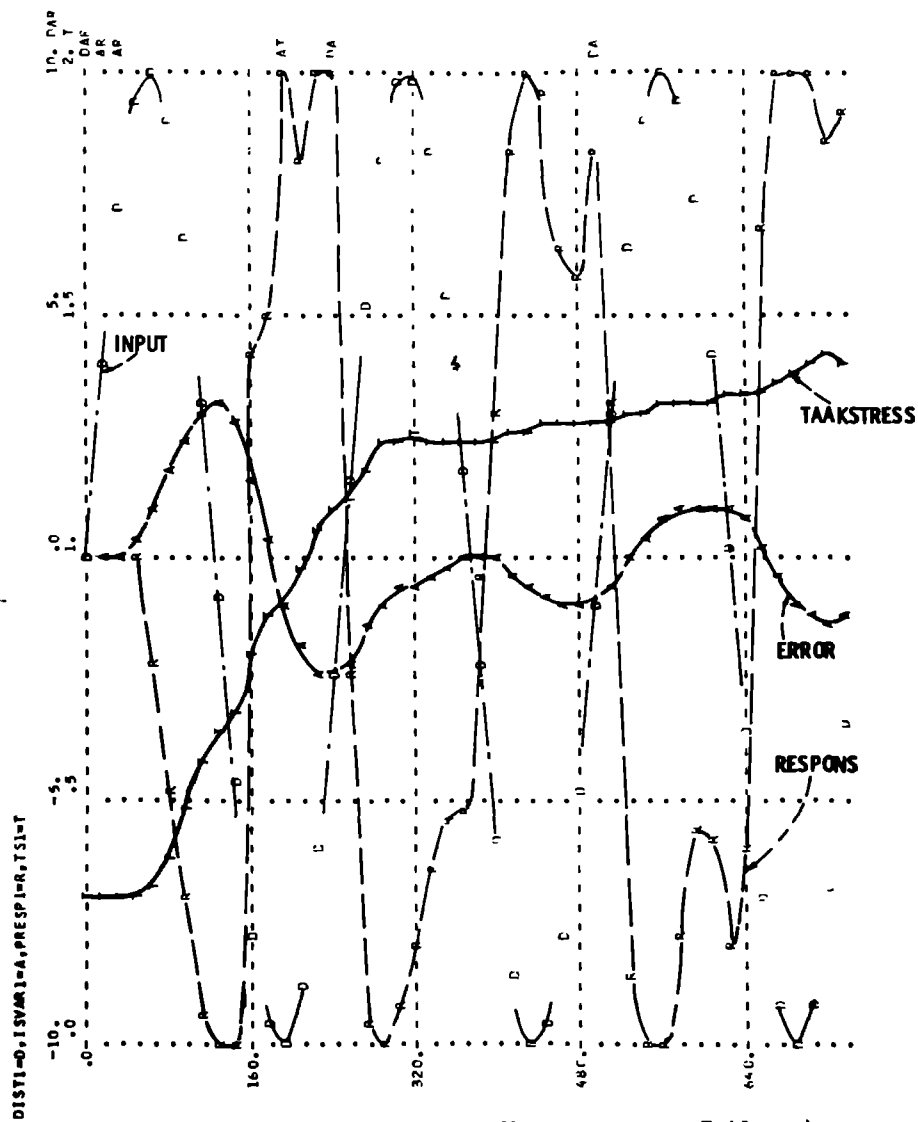
Zie voor een illustratie van de dynamische aspecten van het regelgedrag fig. 7.10 op blz. 216, dat de model output voorstelt van model TM 11.

In tabel 7.1. staan in de laatste kolom de waarden van de taak-stress zoals ze door het model TM11 worden gegenereerd. De eerste 24 sec. tijdens het inslingeren van de sinus neemt de taak-stress sterk toe om daarna, ten gevolge van het regelgedrag van deze operator, veel langzamer toe te nemen (zie variabele  $T$  in fig. 7.10).

De andere modelstructuren zijn te vinden in de bijlagen (2 t/m 5).

Omdat we niet elke modelstructuur afzonderlijk beschrijven zullen we ze in het algemeen voor beide ppn. vergelijken en er uit afleiden welke de overeenkomsten en verschillen zijn tussen hun regelstrategieën.





#### 7.4 Een vergelijking van het stuurgedrag van beide ppn. op basis van de simulatiemodellen

Een vergelijking van de drie modellen, een voor de stap-input en twee voor de sinus-input, toont dat de modelstructuur van pp. T complexer is dan die van pp. J.

Een eenvoudige maat voor de complexiteit van die structuur is het aantal vergelijkingen dat nodig is om de regelstrategie van de betreffende pp. na te bootsen.

Voor de regelstrategie (beslissingsregel en respons) zijn voor het model, dat is aangepast aan de empirische data van een sinus-input met een periode van 24 sec. voor pp. T, 42 vergelijkingen nodig en voor pp. J 28. Voor de sinus met een periode van 36 sec. zijn dit voor pp. T 51 en voor pp. J 28 vergelijkingen en voor de stap-input respectievelijk 27 en 14 vergelijkingen. Het verschil in regelstrategie tussen beide ppn. is vooral een gevolg van het verschillend gewicht dat wordt toegekend aan de differentiële component. In fig. 7.11 en 7.12 worden de weegfactoren, d.w.z. de gewichten toegekend aan de proportionele en de differentiële component, vergeleken voor het model M11 voor beide ppn., en in de fig. 7.13 en 7.14 dezelfde factoren voor het model M12. (Model M11 is aangepast aan empirische data van een sinus-input met een periode van 24 sec., M12 aan een sinus-input met een periode van 36 sec.). (Voor fig. 7.11 en fig. 7.12 zie blz.218)

Wat in fig. 7.11 vooral opvalt is dat het traject voor de taak-stress voor pp. J veel groter is dan voor pp. T. Het gewicht dat pp. T toekent aan de proportionele fout is groter voor een toenemende fout dan bij pp. J. Wanneer de taak-stress groter of gelijk is aan .7 is het gewicht dat pp. T toekent aan de proportionele fout, onder de conditie dat de fout afneemt, gelijk aan nul. Dit betekent dat onder deze conditie de proportionele regeling

FIG. 7.11  
VERGELIJKING 3.25 en 3.27  
MODEL M11

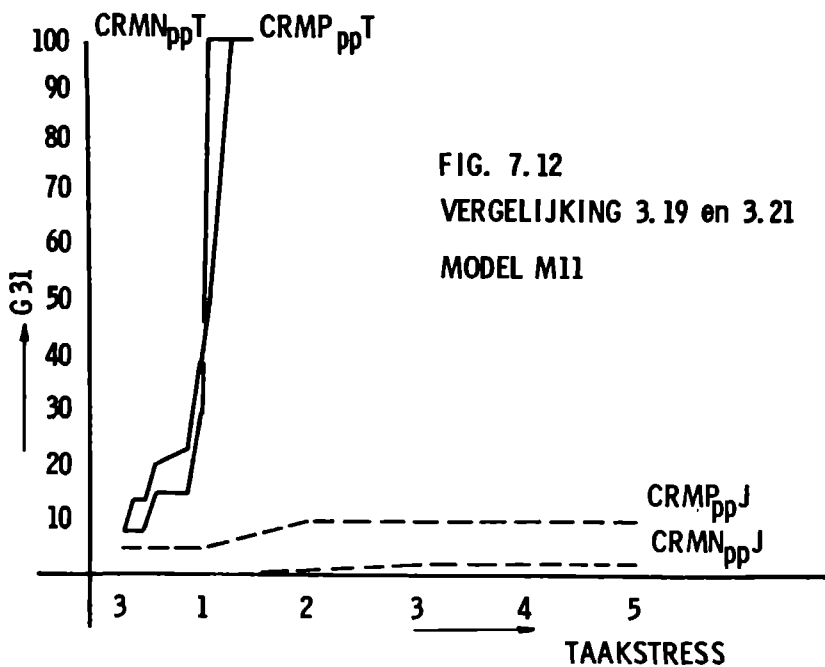
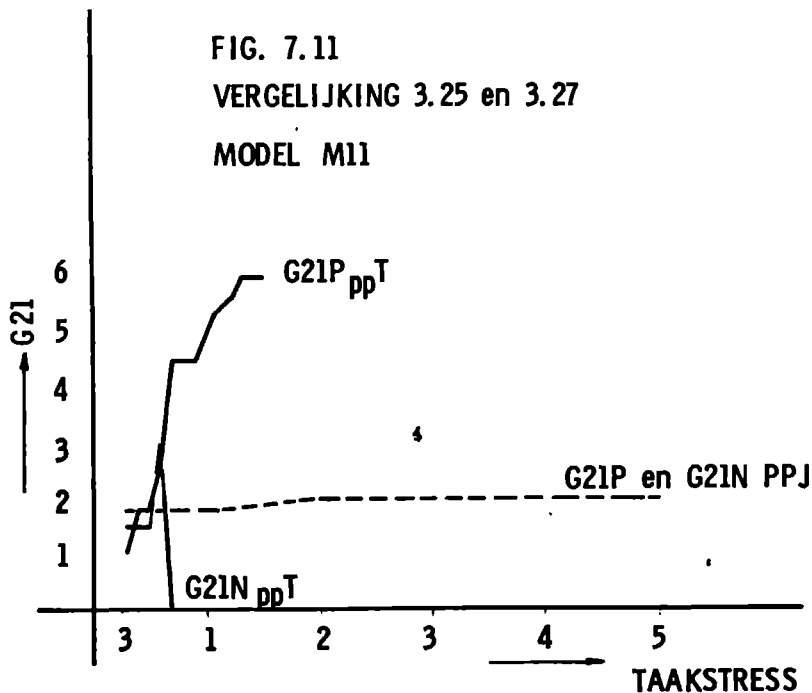


FIG. 7.12  
VERGELIJKING 3.19 en 3.21  
MODEL M11

is weggevalle en alleen de differentiële regeling overblijft. Voor pp. J maakt het toenemen of afnemen van de error wat betreft de proportionele regeling geen verschil uit. We zouden ook kunnen zeggen: het stuursignaal voor de proportionele regeling is symmetrisch, d.w.z. hetzelfde voor toenemende of afnemende error.

Ten aanzien van het gewicht dat wordt toegekend aan de differentiële component is op te merken dat deze factor voor pp. T veel groter is dan voor pp. J. (Zie fig. 7.12). Voor pp. T geldt dat het gewicht dat wordt toegekend aan deze component sterk toeneemt met het toenemen van de taak-stress. Voor een kleiner wordende fout onder de conditie dat de taak-stress groter is dan .7 stuurt deze pp. alleen met de differentiële component. Dit houdt in dat hij tracht de achterstand die hij heeft op het input-signaal door het trage proces, zoveel als mogelijk te compenseren.

Dit is bij pp. J veel minder het geval, met het gevolg dat de respons van pp. J meer samenhangt met de fout op de meter. Bij pp. T, die veel meer tracht te prediceren, is de correlatie met het foutensignaal minder.

Terwijl pp. J de fout op de meter zo goed mogelijk tracht te volgen, met relatief gering tegenstuur, tracht pp. T het fout-signaal voor te zijn, door te prediceren in welke richting het zal gaan en hoe snel het zal veranderen. Ten gevolge van deze predictie is de kans op stuurfouten bij pp. T groter. Door snelle reacties moet hij deze herstellen. Dit betekent dat de variabiliteit van het sturgedrag van pp. T groter zal zijn dan bij pp. J. (Zie de tabellen 6.2 t/m 6.7 van Hoofdstuk VI).

Voor de modellen M12 geldt dat voor beide ppn. het traject van de taak-stress nagenoeg hetzelfde is. Dit is vooral voor pp. J 'n grote verandering verge-

leken met het vorige model. Zoals we reeds in Hoofdstuk VI hebben opgemerkt is het aannemelijk dat dit het gevolg is van een leerproces. Wat heeft pp. J geleerd?

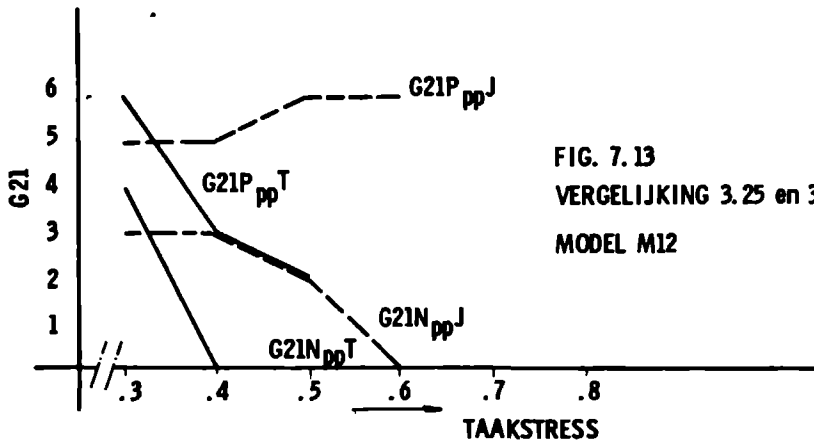
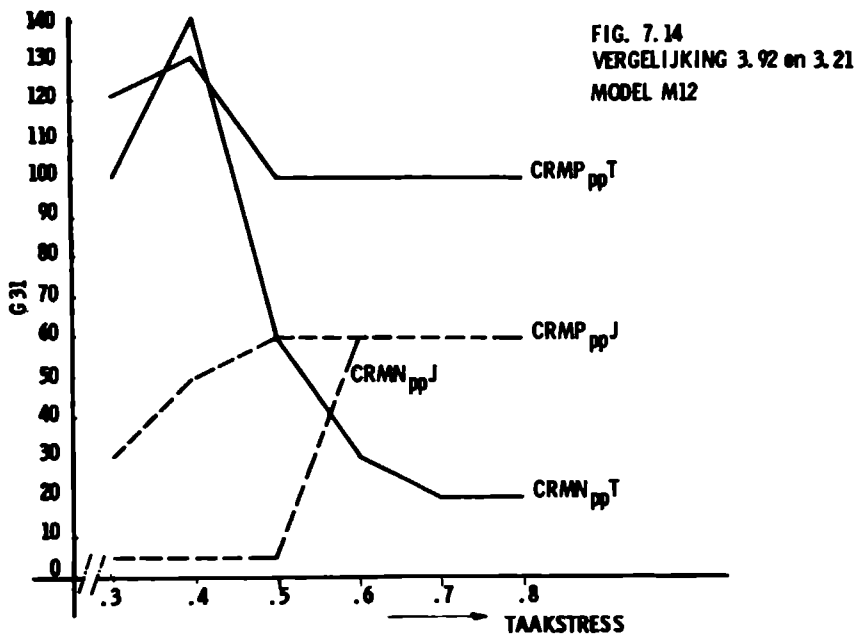


FIG. 7.13  
VERGELIJKING 3.25 en 3.27  
MODEL M12

Uit fig. 7.13 is af te leiden dat het gewicht dat wordt toegekend aan de proportionele fout voor beide ppn. ongeveer hetzelfde is. Echter pp. J kent een veel groter gewicht toe aan de differentiële fout (fig. 7.14). (Voor fig. 7.14 zie blz. 221.)

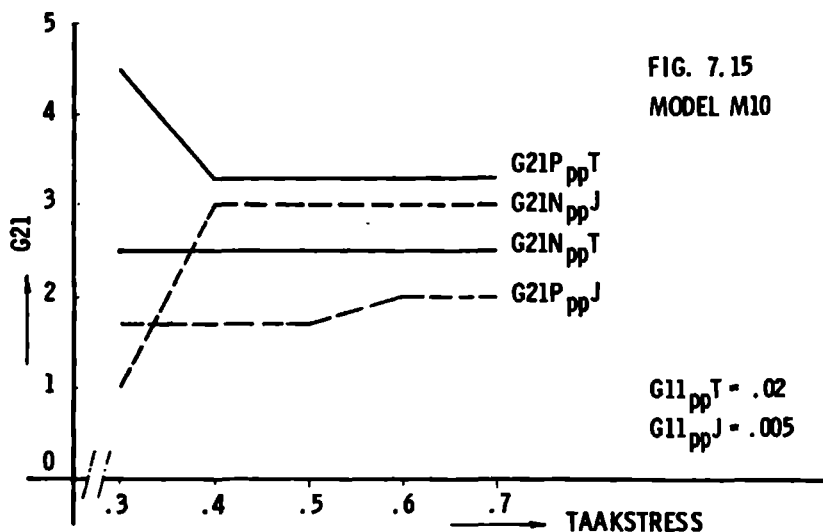
Hoewel de differentiële fout in het algemeen voor een tragere input-sinus geringer is, is het totaal effect toch zodanig dat pp. J veel meer tracht het fout-signaal te prediceren. Hij doet dat ook hier in geringere mate dan pp. T. Opvallend is dat bij pp. T de gewichten die worden toegekend aan de proportionele, maar vooral aan de differentiële fout, afnemen bij toenemende taak-stress. Waarschijnlijk is de tragere sinus, nadat hij is ingeslingerd, beter te regelen door bij toenemende error het groter worden van de fout af te remmen, om vervolgens bij de afnemende fout een geringe tegensturing te geven, zonder dat daardoor de wijzer blijft "hangen". Neemt namelijk de fout af en draait de operator de knop in tegengestel-



de richting, dan kunnen, door de traagheid van het inputsignaal, respons en input elkaar korte tijd in evenwicht houden. De wijzer blijft dan even hangen en loopt ten gevolge van de veranderingen in het inputsignaal langzaam weg. Voor de operator levert dit het nadeel op dat hij dan even niet weet of hij veel of weinig tegenstuur moet geven, d.w.z. hij verkeert korte tijd in onzekerheid. Dit bleek bij de analyse van model TM12 het geval te zijn. Het gevolg was dat pp. T bij afnemende fout voorzichtiger bijregelde (zie CRMN1 van fig. 7.14, pp. T) onder de conditie van toenemende stress.

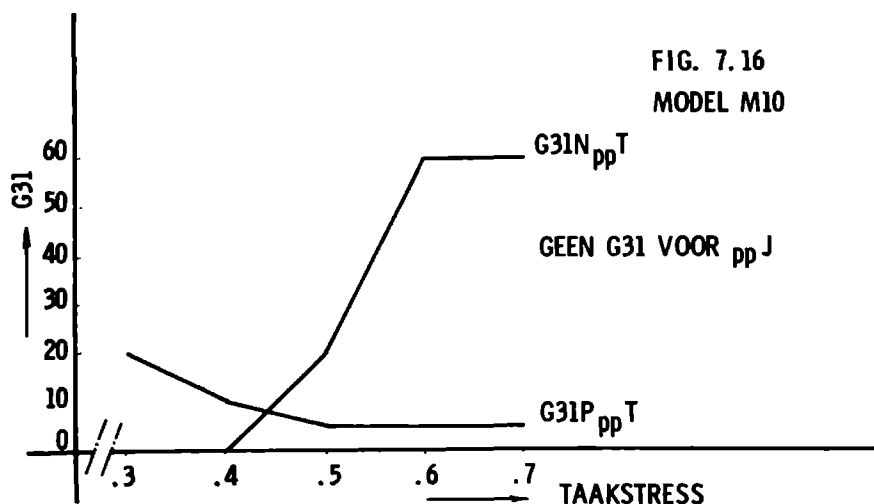
Wat betreft de stap-input komt de interpretatie van de modelstructuur overeen met die van de sinus-input. Het belangrijkste verschil tussen het model van pp. T en pp. J is dat voor pp. J geen differentiële compo-

nent nodig bleek, terwijl het gewicht dat in dit model toegekend wordt aan de integrerende component voor pp. T .02 en voor pp. J .005 bedraagt. Door het ontbreken van een differentiële component en een geringer gewicht toe te kennen aan de integrerende component, komt pp. J meer overeen met een proportionele regelaar. Uit fig. 7.15 kan worden afgeleid dat het



gewicht dat wordt toegekend aan de proportionele fout voor pp. T afneemt bij toenemende taak-stress, onder de conditie dat de fout toeneemt. Voor een afnemende fout blijft het gewicht ( $G21N$ ) constant voor pp. T, en is dus onafhankelijk van de grootte van de taak-stress. Deze factor ( $G21$ ) neemt voor pp. J toe bij toenemende taak-stress, zowel voor de toenemende als voor de afnemende fout. Het gewicht dat in het model van pp. T wordt toegekend aan de differentiële component van de regelstrategie, neemt onder de conditie van een toenemende fout af, bij toenemende taak-stress en neemt sterk toe onder de conditie van de

afnemende fout. (Zie fig. 7.16).



Dit heeft het effect dat bij een afnemende fout de regelknop snel een stuk teruggedraaid wordt totdat door een te gering tegenkoppel van de respons, de fout weer begint toe te nemen, dan wordt de regelknop weer verder opgedraaid totdat de fout weer langzaam afneemt. Het lijkt er op dat deze pp. door middel van trial en error zoekt naar de juiste stand van de knop, ten gevolge waarvan input en respons elkaar opheffen. Omdat het model van de stap-input van pp. J sterk proportioneel regelend is, zal bij een afnemende fout ook de respons gradueel afnemen totdat deze een te gering tegenkoppel geeft t.a.v. de stap-input en de fout weer begint toe te nemen. Door de traagheid van het proces is dit niet direct merkbaar. Het gevolg is dat error en respons bij dit model langer doorslingeren en de slingering veel minder gedempt wordt.

De algemene conclusie die we kunnen trekken uit de analyse van de simulatiemodellen is dat pp. T veel



meer tegenstuur geeft en sneller reageert op veranderingen in het fout-signaal dan pp. J. Pp. T tracht meer de achterstand ten opzichte van het inputsignaal te compenseren door een groot gewicht toe te kennen aan de differentiële fout.

Welk effect heeft dit verschillend gedrag op de kwaliteit van het sturen?

Om ons daarin een inzicht te verschaffen zullen we kijken naar de error en respons en naar de taak-stress. Van de error en de respons zullen we de rms (root mean square) bepalen als maat voor de gemiddelde fout (RMS-ERROR) en de gemiddelde respons (RMS-EFFORT). Wat betreft de taak-stress zullen we bij de modellen letten op de stress aan het einde van de trial. De rms wordt als volgt bepaald:

$$\text{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (X_d - X)^2 dt} \quad (7.1)$$

$T$  = lengte van de trial

$X_d$  = de gewenste waarde van  $X$

$X = X(t)$  de waarden van  $X$ .

We hanteren voor de taak-stress de waarde aan het eind van de trial, omdat we van mening zijn dat deze indicatief is voor de kwaliteit van het regelgedrag.

Uit tabel 7.3A (zie blz. 225) is af te leiden dat de rms-error en de rms-effort (voor de respons) voor model M11 goed overeen komen met de rms-waarden van trial 1, waarop de modellen zijn aangepast.

Voor model M11, trial 1 en 2, geldt in tabel 7.3A dat de amplitude van de sinus-input 10 Volt is, voor de andere is de amplitude 7 Volt.

De rms-error (rmse) van trial 2 is beduidend kleiner dan de rmse van trial 1. Beide ppn. hanteren dus blijkbaar een meer efficiënte regelstrategie voor de op trial 1 volgende trial 2. Wanneer we de rmse en rms-

Tabel 7.3 A

Sinus

Periode 24 sec.

		R M S ERROR		R M S EFFORT	
		PP T	PP J	PP T	PP J
M 11		1.31	2.83	7.63	6.57
M 12		1.08	2.15	5.65	4.85
M 31		.79	.72	6.86	5.76
Trial: 1*		1.32	2.75	7.45	6.60
2*		.85	1.88	7.18	7.67
3		.59	1.06	6.64	6.15
4		.49	.84	6.25	6.76
5		.70	.83	6.39	5.80
6		.77	.66	6.82	6.03

Tabel 7.3 B

Sinus

Periode 36 sec.

M 12		.79	.74	6.43	5.41
M 22		1.24	2.10	4.97	4.26
Trial: 1**		.71	.92	6.45	5.43
2		.77	.80	6.24	6.14
3		.73	1.21	6.60	5.96
4		.58	.84	5.42	6.10

Tabel 7.3 C

Stap Input

M 10		1.43	2.42	8.49	7.24
M 20		1.00	1.88	6.55	5.82
Trial: 1***		1.38	2.42	8.52	7.16
2***		1.08	2.13	9.04	8.27
3		.70	1.41	7.42	6.16
4		.81	1.18	7.44	6.21
5		.48	1.58	7.40	6.49
6		.58	1.31	7.58	6.63

• Amplitude = 10 i.p.v. 7 volt

•• " = 7 volt

••• Hoogte = 9 i.p.v. 7 volt

effort van pp. J bekijken voor de trials 3, 4, 5 en 6 blijkt, dat hij vooral bij trial 5 en 6 in staat is met een geringere inspanning een kleinere rmse te produceren. Terwijl bij pp. J de prestatie verbetert, zeer waarschijnlijk als gevolg van een leerproces zoals reeds in Hoofdstuk VI werd aangenomen, zijn de latere trials 5 en 6 bij pp. T minder goed dan de vergelijkbare 3 en 4. De verklaring die we hiervoor kunnen geven op basis van het inzicht in de regelstrategie van pp. T is, dat hij door meer te prediceren als het ware gokt in welke richting en met welke snelheid de wijzer zal weglopen. Gokt hij juist dan is de prestatie goed d.w.z. de rmse klein, gokt hij fout dan kan de rmse naar verhouding veel groter zijn. Het gevolg is een grotere spreiding in de prestatie van pp. T. Pp. J, die zoals bleek uit de analyse van zijn regelgedrag voorzichtiger bijstuurt, doet het steeds beter.

De modellen M31 doen het wat betreft het rms criterium beter dan de andere twee modellen (M11 en M21). Een vergelijking van fig. 7.12 en 7.14 levert als mogelijke verklaring dat, door een geringer gewicht toe te kennen aan de differentiële component (zie fig. 7.14) voor de afnemende error (CRMN, pp. T), pp. T de wijzer niet te veel over het doel doet heen schieten naar de andere kant. Pp. J daarentegen stuurt meer op basis van de differentiële component bij afnemende error (zie fig. 7.14).

De meer algemene conclusie is dat pp. T, die in het vroege stadium van het experiment onder de conditie van toenemende taak-stress steeds sneller reageert (zie fig. 7.11 en 7.12), in de latere fase (zie model M12) onder toenemende stress voorzichtiger wordt. Dit verschijnsel is bij pp. J tegenovergesteld. In de beginfase is hij voorzichtig (zie fig. 7.11 en 7.12) bij toenemende taak-stress en in de latere fase geeft hij bij toenemende taak-stress meer en sneller tegenstuur. Pp. T en pp. J convergeren wat betreft

hun regelgedrag. Dit betekent niet dat hun strategie hetzelfde wordt. (Zie bijvoorbeeld fig. 7.11, 7.12, 7.13, 7.14.)

De vergelijking van de rms-waarden van het model M22 in tabel 7.3B (Zie blz. 225) toont nogmaals duidelijk dat de regelstrategie uit de beginfase van het onderzoek minder efficiënt is dan in de latere fase, zie model M12. Model M22 is namelijk model M11 aangepast aan de sinus met een periode van 36 sec., met amplitude 7 in plaats van 10 Volt. Wat betreft de rms-waarden uit tabel 7.3B kan worden geconcludeerd dat het model M12 aansluit bij de empirische gegevens, de trials 1, 2, 3 en 4.

Pp. T regelt onder deze conditie beter bij dan pp. J, want de rmse-waarden zijn lager voor de trials. Een vergelijking tussen de rms-waarden van het model M12 toont dat pp. J ongeveer even goed regelt als pp. T en dit doet ten koste van minder energie (rms-effort).

In tabel 7.3C (zie blz. 225) is de staphoogte van de input voor model M10 en voor de trials 1 en 2, 9 Volt, voor model M20 en de andere trials, 7 Volt. Onder deze conditie is de strategie van pp. T beter dan van pp. J. De rms-waarden zijn beduidend lager voor pp. T, terwijl hij meer energie nodig heeft om dit te bereiken dan pp. J (zie rms-effort).

Wanneer we de resultaten uit tabel 7.3 vergelijken met die van tabel 7.4 (zie blz. 228) dan zien we dat pp. T, die in het algemeen beter bijregelt, de taak-stress meer reduceert dan pp. J voor de stap-input en wat betreft de sinus-input voor de modellen M11, M21 en M22. Echter voor het model dat is aangepast aan de meer recente empirische gegevens (M12 en M31) blijkt pp. J de taak-stress meer te reduceren. We leiden hieruit af dat het volgen van de wijzer gemiddeld een iets grotere fout veroorzaakt, en anticiperen van het traject van de wijzer veroor-

Tabel 7.4

## TAAK STRESS

		PP	T	PP	J
Stap	M 10		.53		1.54
	M 20		.43		1.10
Sinus perio- de 24'	M 11		1.41		6.01
	M 21		1.13		3.58
	M 31		.77		.65
Sinus perio- de 36'	M 12		.78		.57
	M 22		.98		2.46

zaakt gemiddeld een geringere fout. Deze fout is vooral groot wanneer de stuurtaak wordt geleerd. Op de lange duur wijkt de gemiddelde fout voor de operator die zo goed mogelijk volgt (pp. J) niet veel af van de gemiddelde fout van de operator die probeert te prediceren (pp. T), omdat ook deze pp. meer predicerend regelgedrag vertoont.

Pp. J. vertoont in het begin van het onderzoek een grotere taak-stress dan aan het eind van het experiment. Zijn taak-stress is dan zelfs lager dan de taak-stress van pp. T (voor M31 respectievelijk .65 en .77 en voor M12 respectievelijk .57 en .78). De taak-stress hebben we in het model gedefinieerd als:

$$W \int_0^T S |e| \cdot |\Delta e| dt \quad (7.2)$$

$S$  = - of + afhankelijk van grootte  $\Delta e$  en richting van  $e$ .

$W$  = weegfactor

$|e|$  = absolute waarde van de error

$|\Delta e|$  = absolute waarde van de verandering van de error.

Deze maat geeft een goed inzicht in het effect van het stuurgedrag van de operator en biedt tevens de mogelijkheid vast te stellen of de operator nog steeds bezig is efficiënter te leren sturen. Wanneer we de hoogte van de taak-stress voor beide ppn. vergelijken, lijkt dit criterium gevoeliger voor de gehanteerde regelstrategie dan de rms. (Voor de programma statements van de taak-stress zie bijlage 1, verg. 6.1 t/m 6.13).

### 7.5 Het toetsen van het model voor een multiple loop en multiloop stuurtaak

Tot nu toe hebben we een uitvoerige beschrijving gegeven van het stuurgedrag in een enkel-kanaals stuurtaak. Ze is voornamelijk gebaseerd op het vergelijken van het simulatiemodel met empirische data waarbij de structurele en functionele aspecten van het model dienen om een inzicht te krijgen in het stuurgedrag. Wil deze methode van onderzoek doen ook van toepassing kunnen zijn op het beschrijven van het regelgedrag van de operator in de procesindustrie, dan zullen we in elk geval een antwoord moeten geven op twee vragen. Deze zijn:

- 1 Kan het model ook gebruikt worden voor de bestudering van een meer-kanaals taak, waarbij de kanalen niet gekoppeld zijn?
- 2 Kan het model een bruikbaar uitgangspunt zijn voor de bestudering van een meer-kanaals taak, waarbij de kanalen gekoppeld zijn?

Het beantwoorden van de tweede vraag is vooral van belang omdat het aan elkaar gekoppeld zijn van variabelen een van de essentiële moeilijkheden is voor de proces-besturing.

Om deze twee vragen te kunnen beantwoorden hebben we bij de experimentele opzet voorzien in de mogelijkheid twee meters te bedienen met twee knoppen. Beide kanalen zijn identiek en kunnen op dezelfde manier

worden beschreven als de enkel-kanaals taak. Zowel voor het linker als voor het rechter kanaal geldt dat het te besturen proces een derde-orde filter is met een tijdconstante van 12 sec.

Zijn beide kanalen gekoppeld dan wordt een gedeelte van het error-sigitaal (d.i. input - respons) van kanaal 1 doorgestuurd naar het error-sigitaal van kanaal 2, en omgekeerd. Uit voormetingen bleek dat het gedeelte dat naar het kruis-gekoppeld kanaal wordt gestuurd niet te groot mocht zijn omdat in dat geval de kans groot was dat de twee analoge rekenmachines, waarop de twee processen waren geprogrammeerd, overstuurd raakten. Daarom hebben we vastgesteld dat 30 % van het error-sigitaal werd doorgestuurd naar het andere kanaal.

Voor deze twee-kanaals stuurtaak, zowel ongekoppeld (multiple loop) als gekoppeld (multiloop), hebben we dezelfde inputs gebruikt als voor de enkel-kanaals stuurtaak, d.w.z. de stap-input en de sinus-input met de perioden van 24 en 36 sec. Deze inputs kunnen hetzelfde teken of een tegenovergesteld teken hebben, d.w.z. ze zijn of volledig synchroon of ze zijn 180 graden in fase verschoven.

In de experimentele opstelling is de ooghoek afstand tussen de meters ongeveer 40 graden.

In het simulatiemodel is de twee-kanaals stuurtaak als volgt geprogrammeerd: (zie ook par. 5.4)

ESIG1.K = DIST1.K + RESPS1.K	1.7,A
ESIG1 - ERROR SIGNAL 1	(VOLT)
RESPS1 - RESPONSE SIGNAL 1	(VOLT)
LVAR1.K = ESIG1.K + LINK1.K	1.19,A
LVAR1 - LINKED VARIABLE	(VOLT)
LINK1.K = (.3)(ESIG2.K)	1.20,A
LINK1 - PERCENTAGE OF ERROR SIGNAL OF CHANNEL 2	
JOINING CHANNEL 1.	

Wanneer LINK1 en LINK2 nul zijn, zijn beide kanalen ongekoppeld.

Vergelijking 1.8,R wordt nu:

$$\text{SCR1.KL} = (1/\text{SAT})(\text{LVAR1.K} - \text{SVAR1.K}) \quad 1.8,R$$

Voor het tweede kanaal worden in de vergelijkingen alle enen vervangen door een twee en de twee in vergelijkingen 1.20,A wordt vervangen door een een.

Voordat we het model vergelijken met de experimentele resultaten van de twee-kanaals stuurtaak, gekoppeld en ongekoppeld, zullen we ook het effect van het altemnerend waarnemen van de twee processen onderzoeken. Tijdens het uitvoeren van het experiment met de twee-kanaals taak hebben we gegevens verzameld over de gemiddelde observatietijd voor de twee meters. Deze gegevens zijn verzameld door het registreren van de potentialen van de oogspieren. Deze spierpotentialen stelden ons in staat vast te stellen wanneer de pp. een bepaalde meter observeerde en hoe lang hij dat deed.

De gegevens over de gemiddelde observatietijd stellen ons in staat te onderzoeken of het daar op aangepaste model beter past bij de empirie dan een model zonder informatie over de oogbewegingen, d.w.z. zonder informatie over het altemnerend observeren van de "displays". Tevens stellen ze ons in staat te controleren of de operator altemnerend stuurt en dus functioneert als een een-kanaals regelaar die eerst het ene kanaal bijstuurt en van het andere de respons constant houdt, en of hij door de hoge mate van samenhang tussen de inputs van beide kanalen synchroon bijregelt, weliswaar de beide meters altemnerend observerend.

Om ons daar een inzicht in te verschaffen hebben we een zogenaamde oogbewegings flip-flop geprogrammeerd. De gemodelleerde operator kijkt naar meter 1 en volgt de wijzer, zoals we reeds aangenomen hebben met sample



tijden van .1 sec.

Ondertussen stuurt hij het andere kanaal, door de regelknop te houden op een waarde die afhankelijk is van de laatst waargenomen waarde van de betreffende meter.

### 7.5.1 De oogbewegings flip-flop

We zullen 'n beknopte beschrijving geven van de flip-flop.

Omdat de meeste namen van de variabelen geen verklaring behoeven, zullen we bij de beschrijving een lijst geven van de betreffende vergelijkingen (zie bijlage 6).

De operator kijkt bijvoorbeeld naar de linker meter (kanaal 1). Zolang hij naar links kijkt loopt een tijd-klok (INT1). Wordt de waarde van die klok groter dan een geobserveerde sample tijd (ST1) dan gebeuren er twee dingen, een variabele X1 neemt plotseling een waarde nul aan in plaats van een en de poort (GATE2) klapt open (waarde 1). Wanneer die poort openklapt begint een pulsmeter (INT22) te lopen. Deze pulsmeter geeft een tijdsinterval DT nadat de poort is opengeklapt, een puls met hoogte 1, vervolgens elke DT daarna tengevolge van het lek (OUT22) een puls met geringere hoogte ( $OUT.KL = 1.5 \times INT22.K$ ). Dit betekent dat slechts een tijdsinterval DT de puls INT22 groter is dan een drempelwaarde van .8 en er dus slechts eenmaal een signaal G02 wordt afgevuurd. Dit signaal G02 zorgt er voor dat de tijd klok INT2 terugspringt op de nul. Tegelijkertijd richt de operator zijn oog naar de andere meter, EYEL (=EYE LEFT) wordt nul en RIGHT wordt 1, d.w.z. hij kijkt naar rechts. Hij kijkt zo lang naar rechts totdat de waarde van de tijd klok INT2 (voor het rechter kanaal) groter wordt dan de experimenteel bepaalde sample tijd (ST2). Op dat moment wordt X2 nul en klapt GATE1 open. GATE1 stuurt de pulsmeter INT11, die eenmalig de tijd klok INT1 terugzet op nul. X2 draagt er zorg voor

dat de operator switcht van rechts naar links. Daar herhaalt zich dan hetzelfde proces.

Zolang de operator meter 1 (ISVAR1) waarneemt, wordt het traject van de wijzer ten gevolge van het intermitterend waarnemen gesampled met sample tijden van .1 sec. Het sample interval (SINT2) voor de andere meter komt in dat geval overeen met de tijd dat de pp. deze meter niet observeert. Het kost de flip-flop 2 DT (= 200 msec.) om van de ene naar de andere positie te springen. Deze tijd ligt in de orde van grootte van de reactietijden van 't oog (Bartz, 1962, 1967) en kan als een redelijke benadering worden beschouwd.

Omdat het 2 DT sec. kost (zie pulsmeter INT11 en INT22) om te switchen van links naar rechts, moet er voor worden gezorgd dat de som van SINT1 en SINT2 twee tijdsintervallen groter is dan de som van ST1 en ST2. De observatie van de twee meters alterneert dus als volgt, vergelijking 2.1,A (par. 5.6) wordt dan:

OVAR1.K = SAMPLE (ISVAR1.K, ST1.K, 0)	2.1,A
OVAR1 - OBSERVED VARIABLE 1 (SCALE UNITS)	
ST1 - SAMPLE INTERVAL CHANNEL 1 (TIME)	

Voor het linker kanaal:

ST1.K = CLIP (1, SINT1, LEFT.K, .5)	2.29,A
-------------------------------------	--------

Voor het rechter kanaal:

ST2.K = CLIP (1, SINT2, RIGHT.K, .5)	2.29,A
--------------------------------------	--------

SINT1 en SINT2 - OBSERVED SAMPLE INTERVAL:  
EXPERIMENTAL DATA

Het signaal-stroomdiagram van deze flip-flop is als volgt: (zie fig. 7.17) (zie blz. 234)

Om te kunnen vergelijken of de modellen die ontwikkeld zijn voor een een-kanalige stuurtaak ook betrouwbaar zijn voor twee-kanalige stuurtaken, ongekoppeld en gekoppeld, hebben we ze vergeleken met deze experimentele condities. We zullen ons m.b.t.

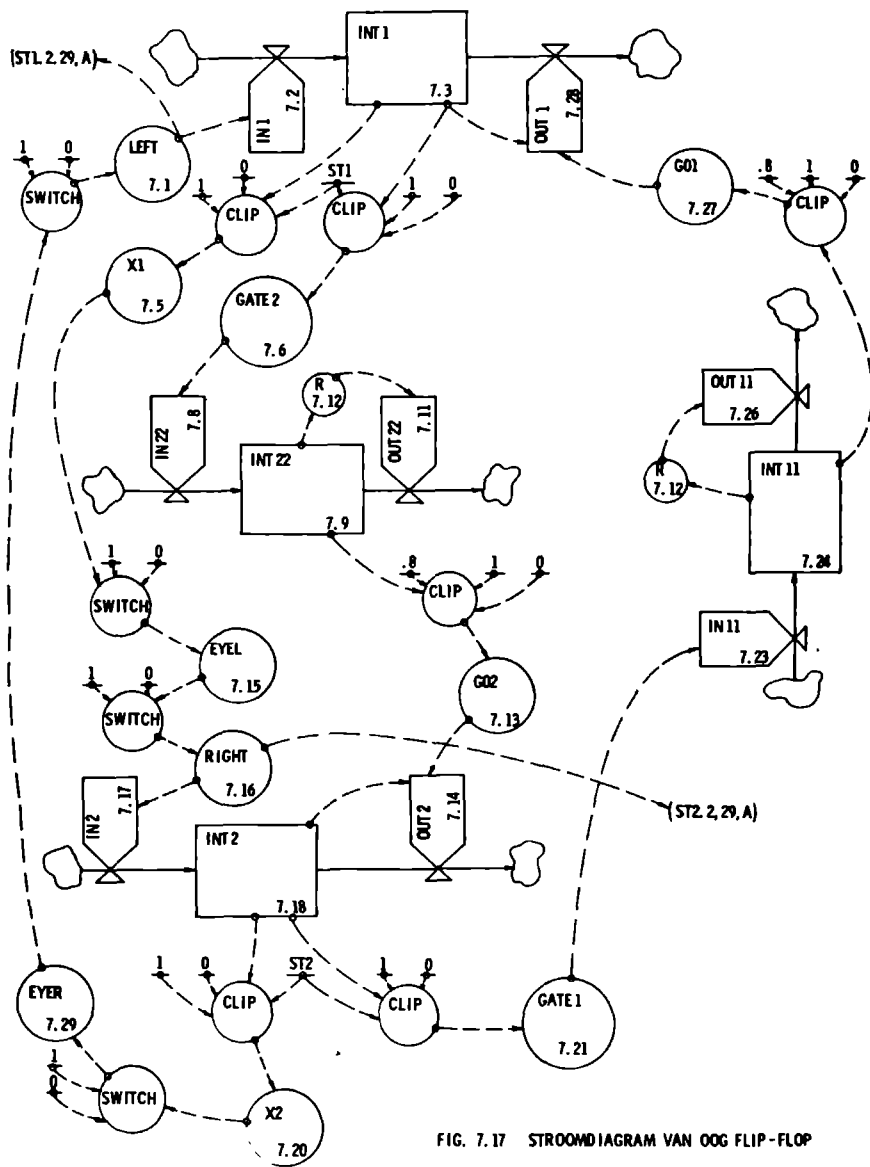


FIG. 7.17 STROOMDIAGRAM VAN OOG FLIP-FLOP

deze analyse richten op de experimentele gegevens van de twee sinus-inputs.

Voor de sinus-input met een periode van 24 sec. hebben we model M21 genomen als uitgangspunt. Dit model hebben we voorzien van de oogbewegings flip-flop voor de twee-kanalige besturing (ongekoppeld). Wanneer we voor de sample intervallen van het model de gegevens gebruiken van twee experimentele trials, verkrijgen we twee maal twee tijdreeksen. Deze zijn M211L, M211R en M212L, M212R. (L en R betekent linker en rechter kanaal.) Het model M21 voorzien van de koppeling tussen beide kanalen, echter zonder flip-flop, levert de variabele M21K. Dit model M21K met de flip-flop, ook weer met sample tijden van twee trials levert M21K1L, M21K1R en M21K2L, M21K2R. Met de modellen M11 en M31 verkrijgen we de volgende modelvariabelen (zie tabel 7.5 op blz. 236).

Voor de sinus met een periode van 36 sec. zijn we uitgegaan van model M12.

Dit model, aangepast aan de niet gekoppelde dubbelkanalige stuurtaak, levert met de sample tijden van twee trials de volgende vier variabelen (met flip-flop), M121L, M121R; M122L en M122R. Voor de gekoppelde stuurtaak zonder flip-flop levert M12 variabele M12K. M12K met flip-flop levert overeenkomstig met het voorgaande, de variabelen M12K1L, M12K1R, M12K2L en M12K2R.

**Tabel 7.5****Modelvariabelen voor sinus met periode van 24 sec.**

<b>Stuurtaak</b>	
een - kanaal	M11 (amplitude is 10 volt) M21 (amplitude is 7 volt) M31 (amplitude is 7 volt) (M31 is M12 in tabel 7.6)
twee - kanalen met flip - flop	M211L (L - Links) M211R (R - Rechts) M212L M212R
twee - kanalen gekoppeld met flip - flop	M21K ----- zonder flip - flop M21K1L M21K1R M21K2L M21K2R

De modelvariabelen die zullen worden bestudeerd in relatie met experimentele data, zijn terug te vinden in tabel 7.6 op blz. 237).

**Tabel 7.6****Modelvariabelen voor sinus met periode van 36 sec.**

<b>Stuurtaak</b>	
<b>een - kanaal</b>	M12 (= M31 in tabel 7.5) M22 (= M21 in tabel 7.5)
<b>twee - kanalen met flip - flop</b>	M121L M121R M122L M122R
<b>twee - kanalen gekoppeld met flip - flop</b>	M12K ----- zonder flip - flop M12K1L M12K1R M12K2L M12K2R

Omdat we de modellen willen vergelijken met de experimentele gegevens, zowel voor de respons als voor de error, hebben we de analyse voor elke pp. afzonderlijk opgesplitst in een analyse van de gegevens van beide sinussen. Voor de sinus met een periode van 24 sec. worden 14 experimentele trials vergeleken met 24 modelvariabelen. De matrix waarover de factoranalyse wordt uitgevoerd is derhalve 76 x 76, d.w.z. 38 variabelen voor de respons en 38 variabelen voor de error. Voor de sinus met een periode van 36 sec. maken we gebruik van 22 modelvariabelen en 12 experimentele trials. De matrix is 68 x 68.

We hebben de modellen van beide ppn. eerst vergeleken met de empirische data van pp. T en vervolgens van pp. J. Voor de sinus met een periode van 24 sec. ziet de lijst van variabelen, onderverdeeld in drie groepen, er als volgt uit; (zie tabel 7.7. en 7.8). Deze groepen zijn:

- 1 Variabelen die betrekking hebben op de eenkanaals taak.
- 2 Variabelen die betrekking hebben op de ongekoppelde twee-kanaals taak.
- 3 Variabelen die betrekking hebben op de gekoppelde twee-kanaals taak.

De groepen bestaan voor bijvoorbeeld pp. T uit de volgende variabelen (zie tabel 7.7).

Tabel 7.7

Variabelen m.b.t. sinus met periode van 24 sec.

Groep 1		Groep 2		Groep 3	
EEN KANAAL		TWEË KANALEN		TWEË KANALEN GEKOPPELD	
1	TM11	10	TM211L	18	TM21K
2	TM21	11	TM211R	19	TM21K1L
3	TM31	12	TM212L	20	TM21K1R
4	1 (amplitude 9V)	13	TM212R	21	TM21K2L
5	2 (amplitude 9V)	14	7	22	TM21K2R
6	3	15	8	23	11
7	4	16	9	24	12
8	5	17	10	25	13
9	6			26	14

Deze groep van 26 variabelen wordt gecompleteerd met de overeenkomstige modelvariabelen van pp. J. (Zie tabel 7.8 op blz. 239). Dit zijn in totaal nog 12 variabelen.

Deze laatste groep volgt op groep 3 uit tabel 7.7.

Tabel 7.8

## Modelvariabelen van PP.J

27	JM11
28	JM21
29	JM31
30	JM211L
31	JM211R
32	JM212L
33	JM212R
34	JM21K
35	JM21K1L
36	JM21K1R
37	JM21K2L
38	JM21K2R

Voor de respons levert dit een lijst van 38 variabelen. Wanneer we de responsies correleren met de errors, verkrijgen we voor de sinus met een periode van 24 sec. een matrix van 76 x 76; voor de respons variabelen 1 t/m 38, voor de error variabelen 39 t/m 76. Over deze matrix hebben we een factoranalyse uitgevoerd. De methode van de principale componenten levert, zowel voor pp. T als voor pp. J, twee factoren. Opgemerkt dient te worden dat de lijst van 38 variabelen, voor het vergelijken van de modellen met de experimentele data van pp. J, op



overeenkomstige wijze is ingedeeld als tabel 7.7. De laatste groep van modelvariabelen, de variabelen 27 t/m 38 hebben in dit geval betrekking op pp. T. Voor de weergave van de factormatrices zie bijlage 7 voor pp. T en bijlage 8 voor pp. J.

De variabelen voor de factoranalyse, betreffende de sinus met een periode van 36 sec., zijn als volgt gerangschikt. Voor pp. T ziet de lijst er als volgt uit: (zie tabel 7.9)

Tabel 7.9

Variabelen m.b.t. sinus met periode van 36 sec.

Groep 1			Groep 2		Groep 3	
EEN KANAAL			TWEË KANALEN		TWEË KANALEN GEKOPPELD	
1	TM12	7	TM121L	15	TM12K	
2	TM22	8	TM121R	16	TM12K1L	
3	1	9	TM122L	17	TM12K1R	
4	2	10	TM122R	18	TM12K2L	
5	3	11	5	19	TM12K2R	
6	4	12	6	20	9	
		13	7	21	10	
		14	8	22	11	
				23	12	

In de factoranalyse matrix wordt deze groep gecompliceerd met overeenkomstige modellen van pp. J. Deze groep ziet er als volgt uit: (zie tabel 7.10 op blz. 241)

Wanneer deze 34 variabelen worden vergeleken wat betreft de respons en de error, verkrijgen we een correlatie matrix van 68 x 68, de eerste 34 variabelen hebben betrekking op de respons, de tweede 34 op de error. De principale componenten methode levert

## Tabel 7.10

### Modelvariabelen van PP. J

24	JM12
25	JM22
26	JM121L
27	JM121R
28	JM122L
29	JM122R
30	JM12K
31	JM12K1L
32	JM12K1R
33	JM12K2L
34	JM12K2R

ook hier twee factoren voor pp. J, voor pp. T bleek ook een derde factor interessant. De factoranalyse matrix die betrekking heeft op de empirische data van pp. T is te vinden in bijlage 9, die matrix voor pp. J in bijlage 10.

### 7.6 Analyse

#### -1. SINUS INPUT PERIODE 24 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. T (Factormatrijs zie bijlage 7)

De eerste factor verklaart ongeveer 60 procent van de

variantie. Deze algemene factor contrasteert de respons en de error. De factor-ladingen van de variabelen zijn over het algemeen hoog negatief voor de respons en hoog positief voor de error. Dit geldt zowel voor de modelvariabelen van pp. T als van pp. J.

De factor-ladingen van de tweede factor zijn voor de respons alle positief voor pp. T, en op model JM31 na, alle negatief voor pp. J. We hebben reeds eerder gezien dat model JM31 het meest overeenkomt met de modellen van pp. T. De factor-ladingen van de empirische variabelen van factor 2 zijn voor de responsies hoger dan de overeenkomstige ladingen van de modelvariabelen. Voor de error zijn de factor-ladingen van de empirische variabelen negatief, wat ook geldt voor de factor-lading van de error van variabele JM31. Omdat uit de vergelijking van het stuurgedrag van beide ppn. reeds was afgeleid dat pp. T meer tracht het fout-sigitaal te prediceren en daarom, vooral bij het afnemen van de fout, snel bijstuurt, ten gevolge waarvan zijn responsies eerder de nulwaarden passeren dan bij pp. J, lijkt factor 2 het beste te interpreteren als de faseverschuiving tussen de responsies. Zo is de faseverschuiving voor de trials 3, 4, 5 en 6 groter dan voor de modelvariabelen TM11, TM21 en TM31. De responsies van de laatste variabelen zijn op hun beurt positief in fase verschoven t.o.v. alle modelvariabelen van pp. J, behalve model JM31.

Hoe meer de pp. in fase voor is, des te beter kan hij het toekomstig traject van het error-sigitaal prediceren. Een vergelijking tussen de faseverschuiving van de trials 3, 4, 5 en 6, de een-kanaals stuurtaak, de trials 7, 8, 9 en 10, de twee-kanaals stuurtaak zonder koppeling en de trials 11, 12, 13 en 14, de twee-kanaals stuurtaak met koppeling, toont, dat de ladingen op factor 2 enigszins afnemen met het klimmen van het groepnummer. Dit is waarschijnlijk een aanwijzing dat de dubbel-kanaals taak met koppeling

moeilijker is dan de dubbel-kanaals taak zonder koppeling en dat deze weer moeilijker is dan de enkel-kanaals taak. Naarmate men beter kan prediceren zal men eerder reageren.

Wat betreft de modellen met de flip-flop voor de oogbewegingen, M211, M212, M21K1 en M21K2, zijn de factor-ladingen voor pp. T op factor 2 hoger voor de modellen M211 en M212 in vergelijking met model TM21. Voor wat betreft de modellen TM21K1 en TM21K2 zijn ze lager. De verklaring moet niet gezocht worden in de verschillende sample tijden over de twee meters. Deze verschillen niet of zeer weinig. Voor de ongekoppelde stuurtaak zijn deze resp. .9 sec. voor TM211L en TM211R, voor TM212L .8 sec. en voor TM212R 1.0 sec. Voor TM21K1L is het sample interval .9 sec., voor TM21K1R .9 sec., voor TM21K2L 1.1 sec. en voor TM21K2R 1.0 sec. Een meer plausibele verklaring is, dat door beide kanalen te koppelen, het effect van het "steekproefs gewijs" sturen de totale stuurtaak beïnvloedt en beide kanalen nadelig beïnvloedt. Dit is niet het geval bij de modellen van pp. T van de ongekoppelde twee-kanaals stuurtaak, omdat beide kanalen elkaar niet (nadelig) kunnen beïnvloeden. Bij de gekoppelde stuurtaak zullen daarom beide responsies iets in fase achter zijn op de responsies van de niet gekoppelde stuurtaak. De vergelijking van model TM21 met de modellen TM211 en TM212 toont dat deze laatste modellen iets hoger laden op factor 2. Dit zou kunnen betekenen dat pp. T beter in staat zou zijn te anticiperen wanneer hij tussen de regelacties wat langer het resultaat van zijn actie afwacht.

Model TM21K dat slechts is aangepast aan de koppeling tussen de kanalen en niet voorzien is van de flip-flop, toont zeer goede overeenkomst met de betreffende empirische data, (de trials 11, 12, 13 en 14). Samenvattend kunnen we hier uit afleiden dat de modellen die afgeleid zijn van model TM21 een

redelijke overeenkomst vertonen met de empirische gegevens. Het model JM31 komt het beste overeen met de empirische gegevens van pp. T, wat betreft deze analyse.

-2. SINUS INPUT PERIODE 24 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. J  
(zie bijlage 8)

Deze factormatrijs levert een zelfde beeld als de vorige. Een algemene factor (F1) contrasteert de respons en de error. Een tweede factor (F2) vertoont de onderlinge faseverschuiving van de variabelen. In het algemeen liggen de responsies van pp. T in fase voor op de responsies van pp. J voor wat betreft de modelgegevens die zijn afgeleid van model JM21. De flip-flop heeft een groter nadelig effect voor de modellen van de ongekoppelde twee-kanaals taak. In vergelijking met de overeenkomstige modellen bij pp. T, zou een verklaring kunnen zijn dat het afremmen van pp. T, door een vertraging in te bouwen, een positief effect heeft omdat deze in het algemeen te fel reageert. Voor JM211 en JM212, die meer gematigd reageren, is deze extra vertraging echter nadelig omdat daardoor het stuurgedrag nog trager wordt. Door de kanalen te koppelen worden de responsies van pp. J (JM21K) iets groter en ze hebben daardoor iets meer effect. Het gevolg is dat ze in fase minder achter zijn. Ook hier is model JM31 het best passende. Het komt goed overeen met nagenoeg alle empirische data. Het aanpassen van het model aan de flip-flop, betekent evenals bij punt 1 van de analyse dat de modellen in het algemeen minder goed bij de empirie passen.

-3. SINUS INPUT PERIODE 36 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. T  
(zie bijlage 9)

Voor de analyse van deze factormatrijs leek het interessant drie factoren te analyseren. Voor enkele variabelen bleek dat wanneer ze hoog positief laden op factor 2, ze weinig of negatief laden op factor 3.

Factor 1 is evenals bij punt 1 en 2 een algemene factor voor het respons en error contrast. Factor 3 komt het meest overeen met de factoren 2 uit de vorige analyses. Wanneer we letten op de modellen TM12, TM22, JM12 en JM22, blijken TM12 en JM12 op factor 3 positief te laden, terwijl de modellen TM22 en JM22 er negatief op laden.

Beide laatste modellen geven een veel tragere respons. Tussen beide factoren heeft zich een nieuwe factor genesteld. De tweede factor kan het beste geïnterpreteerd worden als de factor die aangeeft hoe rustig de respons verandert. Een rustig veranderende respons laadt hoog op deze factor, een abrupt en snel veranderende respons laadt negatief. Pp. T heeft ten aanzien van deze twee laatste factoren een nogal wisselende strategie, wat uit de analyse van Hoofdstuk VI te verwachten is. Wanneer hij probeert te predicieren zal hij zo nu en dan fouten maken in zijn predictie en abrupt moeten reageren. Regelt hij zo "smooth" als mogelijk bij, dan zal hij in plaats van voor te zijn, de veranderingen in de meterstand minder predicieren, d.w.z. hij laadt hoger op factor 2 en lager op factor 3.

Opvallend is dat voor de ongekoppelde twee-kanaals stuurtaak, de modellen met de flip-flop (TM121 en TM122) zo veel verschillen wat betreft hun lading op de factoren 2 en 3. De gemiddelde tijd dat naar de linker en rechter meter wordt gekeken is voor TM121 1.1 sec. voor beide meters en voor TM122 resp. 1.2 en 1.0 sec. Dit zijn de enige verschillen tussen beide modellen, het effect is echter nogal groot. TM121L en TM121R laden positief op factor 2 en negatief op factor 3. Dit betekent dat de responsies smooth zijn en in fase achter.

TM122L en TM122R laden negatief op factor 2, d.w.z. de responsies zijn onregelmatiger, TM122L laadt negatief en TM122R laadt positief op factor 3, d.w.z. dat TM122R in fase voor is op TM122L en op de responsies van de andere twee modellen. Eenzelfde

verschijnsel doet zich voor bij de trials 5, 6, 7 en 8.

Het model JM12 en de daaruit afgeleide modellen laden alle positief op de factoren 2 en 3 (behalve JM121L, dat een zeer kleine lading heeft op factor 3). Dit houdt in dat de responsies die bij deze modellen horen, meer een rustige slingerbeweging volgen en in fase voor liggen op een aantal responsies van pp. T, en op een aantal andere achter liggen in fase. In het model JM12 wordt een hoger gewicht toegekend aan de verandering van de error dan in model JM22 (zie fig. 7.12 en 7.14). Het gevolg is dat JM12 in fase voor ligt op de respons van model JM22, omdat JM12 positief laadt op factor 3 en JM22 negatief.

Het gebruiken van de oogbewegings flip-flop in de simulatiemodellen toont, dat kleine verschillen in de wijze van observeren van beide meters een ander responsie-patroon tot gevolg kan hebben. Het model TM12K, dit is model TM12 met koppeling, laadt meer negatief op factor 2 dan model TM12. Dit houdt in dat door beide kanalen te koppelen, het regelgedrag van het model meer abrupt wordt gemaakt.

De gehanteerde modellen zijn goed bruikbaar om het regelgedrag van de pp. te beschrijven voor de eenkanaals, twee-kanaals en twee-kanaals stuurtaak met koppeling.

#### -4. SINUS INPUT PERIODE 36 SEC.: EMPIRISCHE DATA PP. J (Zie bijlage 10)

Evenals bij punt 3 komt in deze factoroplossing de tweede factor overeen met de wijze van slingeren van de respons. Een rustig verlopende slinger laadt hoog, een snelle afwisselende respons laadt negatief. De eerste factor heeft betrekking op de tegenstelling respons-error. De ladingen op factor 1 zijn hoog zowel voor de modellen (= predictie) als voor de empirische

gegevens. Wat betreft factor 2 hebben de responsies die betrekking hebben op pp. J een positieve lading (behalve JM22 en JM12K2L). Dit is een aanwijzing dat, in tegenstelling met de model responsies van pp. T, pp. J meer rustig slingerende responsies genereert zonder abrupte wendingen. Dit komt overeen met het vertoonde regelgedrag van de beide ppn.

Ook hier geldt dat het model JM12 dat ontwikkeld is voor een een-kanalige stuurtaak, een betrouwbaar uitgangspunt is voor een meer-kanalige stuurtaak met of zonder koppeling. De oogbewegings flip-flop geeft een goede benadering van het feitelijke stuurgedrag. Voor de dubbelkanalige stuurtaak met koppeling is het model met flip-flop een minder goede benadering. Waarschijnlijk omdat de grotere initiële input een grotere responsie tot gevolg heeft, waardoor het gehele proces iets onrustiger wordt en de respons wat minder smooth.

## 7.7 Samenvatting en conclusie

Uit de analyse van de vier factormatrices kan worden afgeleid dat het simulatiemodel, ontwikkeld voor de een-kanaals stuurtaak, een goed uitgangspunt is voor de bestudering van een twee-kanaals stuurtaak met en zonder koppeling.

Dit resultaat komt overeen met de bevindingen van Levison en Elkind (1967), McRuer en Jex (1967) en Todosiev (1967) die na de bestudering van een multiple loop respectievelijk multiloop stuurtaak, concluderen dat de verkregen resultaten met een-kanaals stuurtaken een goed uitgangspunt zijn voor het voorspellen van het menselijk gedrag bij het sturen van meerdere kanalen.

Het aanbrengen van de koppeling en de oogbewegings flip-flop in de modellen levert op enkele punten inzicht in specifiek stuurgedrag van de operator. Over het algemeen vormen de uitgangsmoellen een betere benadering van het experimentele gedrag dan de aangepaste modellen, waarbij de modellen met kop-



peling zonder flip-flop het beter doen dan de modellen met flip-flop.

Uitgangspunt voor het gebruik van de oogbewegings flip-flop was, dat de operator beide meters alternerend bestuurt. Deze hypothese blijkt voor de gebruikte experimentele conditie minder goed van toepassing. Beide kanalen zijn identiek en de inputs zijn dezelfde, behalve dat ze in een aantal gevallen 180 graden in fase zijn verschoven. Dit heeft tot gevolg dat bij de operator een hoge mate van coördinatie bestaat tussen de besturing van beide kanalen. Het betekent dat, wanneer de operator bijvoorbeeld kijkt naar de linker meter, hij deze informatie ook gebruikt voor het bijsturen van het rechter kanaal. Hoewel hij beide meters alternerend onserveert, is de gemiddelde observatie tijd geen indicatie voor het werkelijk stuurgedrag. Naarmate de coördinatie tussen de linker- en rechter hand beter is, zal het vertoonde stuurgedrag meer overeenkomen met de besturing van het enkelvoudig kanaal.

Tabel 7.11 op blz. 249 toont een aantal correlatie-coëfficiënten tussen responsies van experimentele trials.

De correlatie-coëfficiënten zijn voor pp. J alle hoog, wat wijst op een grote links-rechts handcoördinatie. Ook voor pp. T zijn alle coëfficiënten hoog, op een na, die zeer laag is, .05. Dit grote verschil in de coëfficiënten van pp. T is niet zo verbazingwekkend omdat we reeds hebben opgemerkt dat pp. T veel meer tracht het toekomstig traject te prediceren. De kans is steeds aanwezig dat hij een foute predictie maakt en snel moet corrigeren. Maakt hij een fout op het ene kanaal dan zal de respons sterk kunnen afwijken van de respons op het andere. Voor pp. T geldt echter ook dat in het algemeen de links-rechts handcoördinatie groot is.

Tabel 7.11

Correlaties tussen de gelijktijdige respons op twee kanalen:  
experimentele gegevens.

SINUS MET PERIODE VAN 24 SEC.

	PP.T	PP.J
Twee - kanalen	.63 .94	.87 .93
Twee - kanalen gekoppeld	.99 .86	.98 .99

SINUS MET PERIODE VAN 36 SEC.

	PP.T	PP.J
Twee-kanalen	.87 .77	.75 .86
Twee-kanalen gekoppeld	.98 .05	.95 .89

Van alle variabelen zoals ze in de factormatrijs staan, hebben we de rms-waarden voor de error (rmse) en voor de respons (rms-effort) vermeld in tabel 7.12 en 7.13 op blz. 251. De volgorde komt overeen met die van de variabelen in de factormatrijzen.

Tabel 7.12

Sinus periode van 24 sec.

		PP T		PP J	
		RMS - E	RMS - EFFORT	RMS - E	RMS - EFFORT
EEN - KANAAL	1 x	1.31	7.63	2.83	6.57
	2	1.08	5.65	2.15	4.85
	3	.79	6.86	.72	5.76
	4 x	1.32	7.45	2.75	6.60
	5 x	.85	7.18	1.88	7.67
	6	.59	6.64	1.06	6.15
	7	.49	6.25	.84	6.76
	8	.70	6.39	.83	5.80
	9	.77	6.82	.66	6.03
TWEË - KANALEN	10	1.16	6.55	2.48	5.17
	11	1.27	6.87	2.18	4.94
	12	1.16	6.68	2.45	5.12
	13	1.26	7.06	2.21	5.04
	14	1.22	7.54	1.22	6.43
	15	1.29	7.32	1.28	6.46
	16	1.05	6.95	1.12	6.34
	17	1.06	7.03	1.26	6.52
TWEË - KANALEN GEKOPPELD	18	1.08	6.10	2.55	5.88
	19	1.40	7.44	3.19	6.54
	20	1.37	7.36	2.93	6.61
	21	1.43	7.44	3.06	6.36
	22	1.38	7.39	2.96	6.61
	23	1.30	7.43	1.53	6.31
	24	1.36	7.39	1.61	6.77
	25	.90	7.20	1.21	6.86
	26	.85	7.21	1.16	6.82

x Amplitude = 10 Volt i.p.v. 7 Volt.

Uit tabel 7.12 kunnen we concluderen dat de modellen M31 (variabele 3) het beste overeenkomen met de experimentele trials (6, 7, 8, 9). De rmse van pp. T zijn in het algemeen kleiner dan de rmse van pp. J, de rms-effort groter. De variabele 1 voor pp. J

(model JM11) past goed bij trial 4, waar het model op is getoetst, maar wijkt wat betreft de rmse sterk af van de trials 6, 7, 8 en 9. Ditzelfde geldt trouwens ook voor trial 4. Model JM31 past er beter bij. De modellen van pp. T komen goed overeen met de empirische data.

Tabel 7.13

Sinus periode van 36 sec.

		PP T		PP J	
		RMS - E	RMS - EFFORT	RMS - E	RMS - EFFORT
EEN - KANAAL	1	.79	6.43	.74	5.40
	2	1.25	4.97	2.10	4.26
	3	.71	6.45	.92	5.43
	4	.77	6.24	.80	6.14
	5	.73	6.60	1.21	5.96
	6	.58	5.42	.84	6.10
TWEË - KANALEN	7	1.16	7.01	.81	5.73
	8	1.09	6.59	.76	5.77
	9	1.09	6.92	.81	5.73
	10	.93	7.02	.77	5.88
	11	.98	6.33	1.48	4.79
	12	1.18	6.77	1.67	6.12
	13	1.19	7.22	1.03	5.45
	14	1.43	7.20	1.02	5.20
TWEË - KANALEN GEKOPPELD	15	1.30	6.86	.73	5.32
	16	1.27	7.13	.92	6.72
	17	1.20	7.08	.94	6.69
	18	1.57	7.46	.88	6.46
	19	1.63	7.41	.89	6.51
	20	1.35	7.57	1.36	5.64
	21	1.50	7.59	1.31	5.53
	22	1.35	7.83	1.49	4.44
	23	1.09	8.38	.83	4.83

Uit tabel 7.13 kan ook worden afgeleid dat de modellen goed overeenkomen met de experimentele gegevens, zowel wat betreft de rmse als de rms-effort.

Conclusie: Uit de factoranalyse en uit de tabellen (7.12, 7.13) met de rms-waarden kan worden afgeleid dat de ontwikkelde modellen een betrouwbaar uitgangspunt vormen voor de bestudering van zowel een eenkanaals stuurtaak als voor een twee-kanaals stuurtaak met of zonder koppeling. Het zijn vooral de modellen M12 die het best van toepassing blijken te zijn (in tabel 7.12 variabele 3, in tabel 7.13 variabele 1). Beide modellen M12 (TM12 en JM12) kunnen dienen voor een verdere bestudering van het stuurgedrag van operators. Hoewel ze functioneel veel op elkaar lijken, zijn ze structureel sterk verschillend. Het model TM12 is tijdens het inslingeren van de sinus meer een predicerende regelaar dan het model JM12. In de latere fase van de trial prediceert JM12 meer dan TM12. TM12 probeert de storing zo snel mogelijk onder controle te krijgen, om vervolgens rustig verder te regelen. JM12 vertoont meer een gelijkmatig gedrag, met een meer vloeiende respons. TM12 reageert feller met een meer afwisselende respons.

## 7.8 Perspectief

In dit onderzoek hebben we het menselijk gedrag bestudeerd in interactie met een te besturen proces. Het ontwikkelde model is bedoeld als een uitgangspunt voor de bestudering van een n-kanaals stuurtaak. In de procesindustrie zal de operator gewoonlijk veel meer kanalen tegelijkertijd moeten bewaken en bijregelen. Kenmerkend voor deze tak van industrie is dat meerdere kanalen op complexe wijze onderling gekoppeld kunnen zijn en dat alle kanalen niet even belangrijk zijn. Dit heeft tot gevolg dat bij optredende storingen de operator moet beslissen welke kanalen de meeste aandacht en welke minder aandacht verdienen. Dit betekent dat hij een hiërarchie van doelstellingen zal hanteren. De mate van succes van zijn ingrijpen is ons inziens vooral afhankelijk van de wijze waarop hij de verschillende stuurhandelingen

weet te coördineren.

Voor de bestudering van een dergelijk hiërarchisch systeem is de aanpak die we in dit onderzoek hebben toegepast niet geschikt omdat mens en machine op een niveau worden bekeken. De theorie die door Mesarovic et. al. (Theory of Hierarchical, Multi-level Systems, 1970) is ontwikkeld leent zich wel voor een dergelijke aanpak. Van zeer recente datum is een studie die de systeem dynamische aanpak integreert met deze hiërarchische systeem aanpak in het kader van de bestudering van urbane systemen (Richardson en Pelsoci, 1972). Een dergelijke integratie lijkt ons ook zeer vruchtbaar voor de bestudering van complexe mens-machine systemen en in de context van de automatisering van mens-automaat systemen.

SAMENVATTING

De opzet van het onderzoek heeft betrekking op een gedetailleerde beschrijving van het stuurgedrag van een operator in een compensatoire volgtak. Onder een gedetailleerde beschrijving verstaan we een beschrijving die van moment tot moment het gedrag van de operator weergeeft in interactie met de toestand van het proces. Traditioneel kan men bij de beschrijving van de stuurtaak in de procesindustrie twee benaderingswijzen onderscheiden: een psychologische en een technische. Gaat men uit van de psychologische benadering dan zal men veelal gebruik maken van observatietechnieken. Deze aanpak heeft geleid tot een aantal lijsten, die de observator in staat stellen het operatorgedrag te scoren naar het aantal klassen waarin men het gedrag heeft ingedeeld. Het grote bezwaar dat men tegen deze aanpak kan aanvoeren is, dat het met behulp van een dergelijke lijst niet mogelijk is het operatorgedrag te beschrijven in directe interactie met het te besturen proces. Gaat men uit van de technisch-mathematische benaderingswijze, dan wordt de operator beschouwd als een component van het te beschrijven mens-machine systeem. Deze beschrijving geschiedt in termen van lineaire of kwasi-lineaire feedback modellen. Het gebruik van deze modellen wordt vooral gemotiveerd vanuit de doelstellingen van de techniek. De ontworpen systemen moeten namelijk op de eerste plaats stabiel zijn binnen zekere grenzen.

In Hoofdstuk IV zijn we ingegaan op de nadelen van het lineaire model als middel voor de beschrijving van het operatorgedrag. De conclusie is dat het lineaire feedback model een onbruikbaar uitgangspunt is voor het beschrijven van het niet-lineaire operatorgedrag. Volgens Fitts (1951) is juist de non-lineariteit het meest belangrijke en meest uit-

dagende aspect van de operator.

Uit deze twee benaderingswijzen kunnen we concluderen dat de psychologische aanpak minder relevant is voor de technicus-ontwerper omdat het operatorgedrag niet gerelateerd kan worden met het dynamische gedrag van de machine of het proces. De technische aanpak is psychologisch weinig relevant omdat volgens de opvattingen van veel onderzoekers door het gebruik van lineaire feedback modellen, de meest interessante aspecten van het operatorgedrag, dat duidelijk niet lineair is, buiten beschouwing worden gelaten. De scheiding tussen psychologie en technologie wordt nog versterkt door het verschillend wetenschappelijk taalgebruik.

In het eerste hoofdstuk hebben we geconstateerd dat de psychologie gebruik maakt van constructen zoals bijvoorbeeld motivatie, aandacht en vaardigheid. De technicus maakt gebruik van concepten als lineariteit, stabiliteit, filter en modulatie.

Dit verschil in taalgebruik vormt een barrière voor de doorstroming van de verworven kennis en inzichten tussen de genoemde disciplines. Als zodanig is het een rem op de ontwikkeling van ergonomisch onderzoek dat in elk geval interdisciplinair moet zijn. Deze voor de ergonomie fundamentele problematiek is de aanleiding geweest voor de vorm waarin we het onderzoek hebben uitgevoerd. Opzet was niet slechts een beschrijving van de stuurtaak, de beschrijving moest van zodanige aard zijn dat deze én psychologisch relevant is én de mogelijkheid biedt de mens te beschrijven in termen die compatibel zijn met de kenmerken van het te besturen proces. Het ontwikkelde simulatiemodel voldoet aan beide eisen en het biedt de mogelijkheid niet-lineaire aspecten van het operatorgedrag in te bouwen. Zoals uit het simulatiemodel namelijk blijkt zal de wijzer een drempelwaarde moeten overschreiden voordat de operator begint te reageren. Tevens hebben we aangetoond dat de gewichten die worden toegekend aan de proportionele



en differentiële error variëren en niet-lineair veranderen als functie van de taak-stress. We hebben de taak-stress gedefinieerd als een integraal van het product van de error en de verandering van error en door middel van een regressie analyse aangetoond dat een dergelijke definiëring plausibel is. In het model is de taak-stress een onafhankelijke variabele voor de operator, maar hij is tevens afhankelijk van de mate van succes van het bijregelen. Uit het onderzoek is gebleken dat naarmate de operator beter bijregelt, hij de taak-stress meer reduceert. Tevens hebben we aangetoond dat het niet-lineaire model beter bij de empirische gegevens past dan het er uit afgeleide lineaire model.

Het experiment dat we hebben uitgevoerd om het model te valideren had betrekking op het sturen van een derde-orde vertraging met een tijdconstante van 12 sec. Als testsignalen hebben we stappen en sinussen gebruikt. Het onderzoek is uitgevoerd met twee geoefende proefpersonen. Uit de analyse van de correlatie matrijzen in Hoofdstuk VI en de vergelijking van de root mean square waarden van het model en het experiment, kunnen we concluderen dat er voldoende redenen bestaan om het simulatiemodel niet te verwerpen. Een belangrijke conclusie uit het onderzoek is, dat de ppn. verschillende regelstrategieën hanteren en dat zij afzonderlijk anders reageren op de verschillende testsignalen. Beide ppn. ontwikkelden voor de verschillende inputs, verschillende regelstrategieën. Deze conclusie komt overeen met de opmerking van Garner (1967) dat er sterke aanwijzingen zijn dat de operator zichzelf programmeert in overeenstemming met zijn dynamische omgeving. Ook de verandering van de weegfactoren in de regelstrategie stemt met deze gevolgtrekking overeen, d.w.z. de aard van de respons van de operator verandert gedurende de tijd. In deze zin is het ontwikkelde model adaptief.

Vervolgens hebben we onderzocht of het model dat betrekking heeft op een een-kanaals stuurtaak ook bruikbaar is voor de bestudering van een twee-kanaals stuurtaak, waarbij de kanalen wel of niet gekoppeld zijn. We hebben het simulatiemodel aangepast aan de twee-kanaals stuurtaak, met de mogelijkheid beide kanalen te koppelen. Dit model hebben we gebruikt voor het voorspellen van het operatorgedrag in de overeenkomstige experimentele situatie. Uit de analyse in Hoofdstuk VII volgt dat het simulatiemodel voor de dubbelkanalige taak overeenkomt met de bevindingen van het empirisch onderzoek. Omdat de structuur van het model voor de twee-kanaals taak voor elk kanaal volledig identiek is met de structuur van het model voor de een-kanaals taak, leiden we hieruit af dat de ppn. in de dubbelkanalige stuurtaak voor elk kanaal afzonderlijk nagenoeg dezelfde regelstrategie hanteren als voor de een-kanaals stuurtaak. Dit resultaat komt overeen met de conclusies van Levison en Elkind (1967), McRuer en Jex (1967) en van Todosiev (1967), dat modellen van een een-kanaals stuurtaak een goed uitgangspunt zijn voor het voorspellen van het operatorgedrag bij het sturen van meerdere kanalen.

We hebben ook onderzocht of gegevens over het observeren door de proefpersonen van de twee kanalen de overeenkomst tussen het model en de empirie vergroot. De wijze van observeren van beide kanalen werd bepaald door het registreren van de oogbewegingen van de proefpersoon, terwijl deze alternerend naar de twee meters kijkt. Informatie over de wijze van observeren van de twee kanalen verhoogt echter niet de overeenkomst tussen empirie en model. Door de regelstrategieën van beide ppn. onderling te vergelijken zijn we in staat verschillen en overeenkomsten zeer gedetailleerd te beschrijven.

Uit de analyse van het dynamisch gedrag van beide ppn. komen we tot de volgende algemene conclusie. De ene pp. tracht het toekomstig traject van de wij-

zer meer te anticiperen dan de andere. Hij tracht met andere woorden de ontwikkelingen voor te zijn. De andere pp. laat zijn gedrag meer afhangen van de momentane stand van de wijzer, hij volgt dus meer de ontwikkelingen. In termen van de root mean square error betekent dit dat de eerste pp. een betere regelaar is dan de tweede. Het type stuurgedrag van de eerste pp. houdt echter in dat het de kans vergroot extra verstoringen in het proces te introduceren omdat het door zijn anticiperend gedrag meer foutieve responsies introduceert. Bij de tweede pp. is dit niet het geval.

## SUMMARY

The purpose of this study was to develop a method to describe in detail human operator behavior in a compensatory tracking task. By this is meant a description which makes it possible to show the interaction between the human operator and the state of the process at any moment in time. To describe the human operator task in the process industry one can usually distinguish two different approaches: a psychological one and a technical one. Psychologists often use observation techniques. This method enables the researcher to score human operator behavior according to predetermined categories. The main objection to this approach is that by using such a list one is not able to describe human behavior in direct relation to the state of the process. Using the technical-mathematical approach, the human operator is characterized as a component of a man-machine system. Human behavior is described by means of linear or quasi-linear feedback models. Reasons for using these kinds of model are purely technical, seeing the systems designed have to be stable within certain limits. In Chapter IV the disadvantages of the linear feedback model as a means to describe human operator behavior were discussed. It was pointed out that a linear feedback model is not appropriate for describing non-linear human behavior. According to Fitts (1951) non-linearities are the most interesting and challenging aspects of the human operator.

Relating both approaches, one may conclude that the psychological approach is less relevant to the engineer-designer, because human behavior cannot be compared with the dynamic characteristics of the machine or process. The technological approach is

psychologically less relevant because, as many researchers agree, the use of linear feedback models forces one to ignore the most interesting aspects of human behavior. The separation between psychology and technology has been intensified by the use of different scientific languages. In Chapter I it was mentioned that psychology uses constructs such as motivation, attention and skill. The engineer uses concepts such as linearity, stability, filter and modulation. This difference in language is a barrier to a fruitful flow of scientific information between both disciplines. As such it also inhibits the progress of research in ergonomics, which in essence has to be interdisciplinary.

Because of this fundamental problem in ergonomics we have looked for an appropriate form in which to carry out our study. The purpose was not merely the description of a control task; the description also had to be relevant from a psychological point of view and suitable for expressing human operator behavior in terms that are compatible with the characteristics of the process, which has to be controlled.

The simulation model we have developed satisfies both requirements, for it is possible to include non-linear aspects of human operator behavior. These non-linear aspects refer to a threshold in the displayed error before the operator starts responding and to the weighting factors in the proportional and differential error.

These factors vary in a non-linear manner as a function of the task stress. We have defined the task stress as the integral of the product of error with change of error. In Chapter V a regression analysis was performed to show that such a definition is plausible. In the model, the task stress is an independent variable for the human operator, but it is dependent on the operator's performance in controlling the process. It was shown that the better the human operator performs his control task, the more he

is able to reduce the task stress. In this study it was shown that the non-linear model fits the empirical data better than the corresponding linear model.

The experiment that was performed to verify the model involved the control of a third order delay with a time-constant of 12 seconds. Steps and sinusoids were used as test inputs. The experiment was performed with two trained subjects.

From the analysis of the correlation coefficients in Chapter VI and the analysis of the root mean square error and effort of model data and experimental data the conclusion was reached that sufficient evidence exists to accept the model and not to reject it. It is important to note that both subjects used different control strategies to various test signals. This result fits Garner's (1967) remark that there is strong evidence that the human operator programmes himself according to his dynamic environment. Also the variation of the weighting factors of the proportional and differential components of the control-strategy agrees with the conclusion that human operator behavior changes over time. This means that we have developed an adaptive model. Subsequently we have checked whether the model which is related to a one-channel control task is also applicable to a two-channel control task, coupled and un-coupled. We have adapted the model to the two-channel control task, with the possibility of crosscoupling. We have applied this model to predict human operator behavior in a corresponding experimental situation. From the analysis in Chapter VII it follows that the model of the two-channel control task fits the experimental situation. Since the structure of this model with respect to each channel is completely identical to the structure of the model of a one-channel control task, we conclude that both subjects use almost the same control strategy for each of both channels as in the one-channel control task.

This fits the results of the studies of Levison and Elkind (1967), McRuer and Jex (1967) and Todosiev (1967), that models of a one-channel control task can be used to predict human operator behavior in a multiple loop and multiloop tracking task. We have also analysed whether data about the visual sampling process of both channels does increase the correspondence between experiment and model. We have collected data about the eye movements of both subjects, while observing both channels. However, information about the observing behavior of both subjects did not increase the validity of the model.

By comparing the control strategies of both subjects we have been able to describe similarities and differences between them in great detail. Analysing the dynamic behavior of both subjects, we may generally conclude that the one subject tries to anticipate the track more than the other. He tries to be ahead of what is going on in the process. The other subject depends more on the actual state of the process; i.e. he follows the changes in the process. With respect to the root mean square error criterion the first subject is a better controller than the second one. The kind of control of the first subject, however, does increase the chance to introduce additional error into the process, because of his anticipatory behavior. This is not the case with the other subject.

Thanks are due to Mrs. J. Thomassen-Baker for her corrections in this English Summary.

LITERATUUR

- Ackoff, R.L., 1969, Systems, organizations, and interdisciplinary research.  
In Emery, F.E. (ed.), Systems Thinking.  
Penguin Modern Management Readings. (p. 332)
- Adams, J.A., 1961, Human tracking behavior. Psych. Bulletin, vol. 58, no. 1, 55-79.
- Angyal, A., 1969, A logic of Systems.  
In Emery, F.E. (ed.), Systems Thinking.  
Penguin Modern Management Readings. (p. 26)
- Åström, K.J., en Eykhoff, P., 1971, System identification - A survey.  
Automatica, vol. 7, 123-162. Pergamon Press.  
(p. 124)
- Bartz, A.E., 1962, Eye movement latency, duration and response time as a function of angular displacement. J. Exp. Psychol. 64, 318-324.
- Bartz, A.E., 1967, Fixation errors in eye movement to peripheral stimuli.  
J. Exp. Psychol., 75, 444-446.
- Bauer, A.R. (ed.), 1966, Social Indicators.  
The M.I.T. Press, Cambridge, Mass. (p. 4)
- Beishon, R.J., 1967, Problems of task description in process control.  
In Singleton, W.T., et. al. (eds.), The human operator in complex systems.  
Taylor and Francis Ltd., London. (p. 82)
- Bekey, G.E., 1962, The human operator as a sampled data system. I.R.E. Trans. Hum. Factors in Electronics, HFE - 3, 43-51. (p. 45)



- Bekey, G.E., 1970, The human operator in control systems. In De Greene, K.B. (ed.), Systems Psychology. McGraw-Hill, N.Y. (p. 255-256, 269, 262)
- Bentley, M., 1952, Forecasting, timing, and other primary factors in government of certain Bio-mechanical systems. Amer. J. Psychol., 65, 329.
- Berliner, C., Angell, D., and Shearer, J.W., 1964, Behaviors, measures and instruments for performance evaluation in simulated environments. Sympos., and workshop quantification on human performance. Albuquerque, N.M.
- Bertalanffy, L. von, 1968, General System Theory. George Braziller, New York. (p. 33)
- Birmingham, H.P., and Taylor, F.V., 1954, A design philosophy for man machines control systems. PROC. IRE, 42, 1748-1758. (p. 1752)
- Birmingham, H.P., and Taylor, F.V., 1958, Why quickening works. Automatic Control, April, vol. 8, no. 4, 16-18.
- Briggs, G.E., 1962, Pursuit and compensatory modes of information display: A review. Army Med. Res. Lab. Rep., no. 62 - 93.
- Buckley, W. (ed.), 1968, Modern systems research for the behavioral scientist. Aldine-Publishing Company, Chicago.
- Conklin, J.E., 1957, Effect of control lag on performance in a tracking task. J. of Exp. Psych., vol. 53, no. 4, 261-268. (p. 266, 267)
- Conrad, R., 1955, Some effects on performance of changes in perceptual load. J. of Exp. Psych., vol. 49, 313-332. (p. 320)
- Craik, K.J.W., 1947, Theory of the human operator. I The operator as an engineering system. Brit. J. Psychol., 38, part 2, 56-61.

- Craik, K.J.W., 1948, Theory of the human operator.  
II Man as an element in a control system.  
Brit. J. Psych., 38, part 3, 142-148.
- Crossman, E.R.F.W., 1960, Automation and skill.  
Problems of progress in industry, no. 9,  
London: H.M.S.O.
- Crossman, E.R.F.W., 1963, Analysis of non-repetitive  
manual work (Abstract).  
Ergonomics, 6, 302-303.
- Davis, D.J., 1959, Automation in the automotive  
industry. In Jacobson, H.B., and Roucek, J.S.  
(eds.), Automation and society. Philosophics  
Library, N.Y. (p. 36)
- Dirken, J.M., 1970, Operatortaken in de proces-  
industrie. NIPG werkgroep automatisering.
- Elkind, J.I., 1953, Tracking response in characte-  
ristics of the human operator. Memo no. 40,  
Human factors operations Research Lab., Air  
research and development command, Washington,  
D.C.
- Emery, F.E. (ed.), 1969, Systems thinking. Penguin  
Modern Management Readings.
- Fitts, P.M., and Posner, M.I., 1967, Human perfor-  
mance. Brooks/Cole Pub. Company, Belmont, Cal.
- Fitts, P.M., et. al. (ed.), 1951, Human engineering  
for an effective air navigation and traffic  
control system. Washington, D.C.: National  
Research Council.
- Fogel, L.J., 1963, Biotechnology: Concepts and  
Applications. Prentice Hall, Englewood Cliffs.  
(p. 264)
- Forrester, J.W., 1961, Industrial Dynamics. M.I.T.  
Press, Cambridge, Mass. (p. 13, 56, 58, 59,  
115, 124)

- Forrester, J.W., 1968, Principles of systems. Wright-Allen Press, Cambridge, Mass. (p. 1-1, 3-2, 3-10, 4-3)
- Forrester, J.W., 1968a, Industrial Dynamics - A response to Ansoff and Slevin. Management Science, Vol. 14, No. 9, 601-618. (p. 614)
- Forrester, J.W., 1969, Urban Dynamics. M.I.T. Press, Cambridge, Mass. (p. 1, 9, 10)
- Forrester, J.W., 1971, World Dynamics. Wright-Allen Press, Cambridge, Mass. (p. 1, 15)
- Foster, D., 1968, Automation in practice. McGraw-Hill, London. (p. 4, 8)
- Gagné, R.M. (ed.), 1963, Psychological principles in system development. Holt, Rinehart and Winston, New York.
- Garner, K.C., 1967, Evaluation of human operator coupled dynamic systems. In Singleton, W.T., et. al. (eds.), 1967, The human operator in complex systems. Taylor and Francis Ltd., London. (p. 25, 26, 37)
- Garvey, W.D., Sweeney, J.S., and Birmingham, H.P., 1958, Differential effects of "display lags" and "control lags" on the performance of manual tracking systems. J. of Exp. Psych., vol. 56, no. 1, 8-10. (p. 10)
- Goldstein, D.A., and Newton, J.M., 1962, Transfer of training as a function of task difficulty in a complex control situation. J. of Exp. Psych., vol. 63, no. 4, 370-375. (p. 370, 375)
- Greene, K.B. de, (ed.), 1970, Systems Psychology. McGraw-Hill, N.Y.
- Grinten, P.M.E.M. van der, 1968, Regeltechniek en automatisering in de procesindustrie. Prisma-Technica. (p. 9 - 13)

- Grinten, P.M.E.M. van der, 1970, Regelende rekenmachines. Inaugurale rede, Groningen. (p. 8)
- Hall, A.I.M., 1957, Effect of controlled element on the human pilot. W.H.D.C. Tech. Rep., 57-509.
- Hall, A.D., and Fagen, R.E., 1968, Definition of system. In Buckley, W. (ed.), 1968, Modern Systems research for the behavioral scientist. Aldine-Publishing Company, Chicago. (p. 81, 83)
- Hanken, A.F.G., 1970, Collegedictaat: Systeemleer. T.H.T. (p. 1.7, 1.9-2, 7.1)
- Hick, W.E., 1948, The discontinuous functioning of the human operator in pursuit tasks. Quarterly J. Exp. Psychol., 1, 36-51.
- Hick, W.E., 1949, Reaction time for the amendment of a response. Quart. J. Exp. Psych., 1, 175-179.
- In 't Veld, J., 1970, Collegedictaat: Systemen en modellen. T.H.D. (p. 4)
- Jaffe, A.J., Fromkin, J., 1968, Technology and jobs. Automation in perspective. F.A. Praeger, New York. (p. 18)
- Jordan, N., 1963, Allocation of functions between man and machines in automated systems. J. App. Psych., 47, 161-165.
- Jordan, N., 1968, Themes in speculative psychology. Tavistock Publications, London. (p. 164-166)
- Kidd, J.S., 1963, Human task and equipment design. In Gagné, R.M., Psychological principles in system development. Holt, Rinehart and Winston, New York. (p. 171)
- Kitchin, J.B., Graham, A., 1961, Mental loading of process operators: an attempt to devise a method of analysis and assesment. Ergonomics, 4, 1-15.

- Leeuw, A.C.J. de, 1970, Collegedictaat: Systeemleer I. T.H.E.
- Leuba, H.R., 1964, Quantification in man-machine systems. Human Factors, vol. 6, no. 6, 555-583. (p. 562)
- Levison, W.H., and Elkind, J.I., 1967, Two dimensional manual control systems with separated displays. IEEE on H.F.E., vol. 8, no. 3, 202-210. (p. 209)
- Licklider, J.C.R., 1960, Quasi-linear operator models in the study of manual tracking. In Luce, D.R., Developments in mathematical psychology. The Free Press of Glencoe, Ill. (p. 171, 175, 176, 256, 258, 254)
- Mason, S.J., 1953, Feedback theory - some properties of signal-flow graphs. Proc. I.R.E., vol. 41, no. 9, 1144-1156.
- McCormick, J.E., 1970, Human factors engineering. McGraw-Hill, New York.
- McRuer, D.T., and Krendel, E.S., 1959, The human operator as a servo system element. J. Franklin Instit., vol. 267, 381-403 May 1959; 511-536 June 1959.
- McRuer, D.T., Jex, H.R., 1967, A review of quasi-linear pilot models. IEEE Transaction on human factors in electronics, vol. 8, no. 3, 231-249. (p. 232)
- Meister, D., and Rabideau, G.F., 1965, Human factors evaluation in system development. John Wiley, New York.
- Mesarovic, M.D., 1968, Systems theory and biology - view of a theoretician. In Mesarovic, M.D. (ed.), Systems theory and biology. Proc. of the III systems symposium at Case Institute of Technology. Springer-Verlag, Heidelberg.

- Mesarovic, M.D., Macko, D., and Takahara, Y., 1970, Theory of hierarchical, multilevel systems. Academic Press, New York.
- Minsky, M.L., 1967, Computation, finite and infinite machines. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. (p. 14 e.v.)
- Nauta-Lemke, H.R. van, 1967, Inleiding tot de regeltechniek. Regeltechnische monografieën deel I. Universitaire Pers, Rotterdam.
- Naylor, T.H., Balintfy, J.L., Burdick, D.S., and Chu, K., 1967, Computer simulation techniques. John Wiley, New York.
- Nelson, R.T., 1966, Systems, Models, and Simulation. Mimeographed notes. Graduate school of business administration. U.C.L.A.
- Pitts, W., and McCulloch, W.S., 1947, How we know universals. The perception of auditory and visual forms. Bull. Math. Biophys., 9, 124-147.
- Poulton, E.C., 1966, Tracking behavior. In Bilodeau, E.A. (ed.), Acquisition of skill. Academic Press, New York. (p. 363, 370, 387, 395)
- Pugh III, A.L., 1963, Dynamo user's manual. M.I.T. Press, Cambridge, Mass.
- Richardson jr., J.M., and Pelsoci, Th. M., 1972, Regulation and control of urban environments: a multilevel approach. IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics, volume SMC-2, no. 2, 173-180.
- Roger, J., 1958, Automation: Technology's new face. University of California, Institute of Industrial Relations.
- Russel, L., 1951, Characteristics of the human as a linear servo-element. (M.S. thesis, M.I.T.). In Licklider, J.C.R., 1960, Quasi-linear operator models in the study of manual tracking.

- Schoeffler, J.D., Ostrander, L.E., and Gann, D.S., 1968, Formulation of finite state models of biological control systems. In Mesarovic, M.D. (ed.), Systems theory and biology. Proc. of the III systems symposium at Case Institute of Technology. Springer-Verlag, Heidelberg.
- Siegel, A.I., Wolf, J.J., 1969, Man machine simulation models. Wiley, New York. (p. 141)
- Simón, H.A., 1969, The science of the artificial. M.I.T. Press. (p. 64-65)
- Singleton, W.T., et. al. (eds.), 1967, The human operator in complex systems. Taylor and Francis Ltd., London.
- Stassen, H.G., and Lunteren, A. van, 1970, Annual report 1969 of the man machine systems group. Delft.
- Stroud, J.M., 1954, Notes on the fine structure of psychological time. Tech. Memo, no. TM-49, Navy Electronics Laboratory, San Diego, Cal.
- Sultan, P.E., Prasow, P., 1964, Automation: Some classification and measurement problems. In Labour and Automation Bulletin I.
- Taylor, F.V., 1963, Human engineering and psychology. In Koch, S., Psychology: A study of a science. Vol. 5, McGraw-Hill, New York. (p. 886)
- Todosiev, E.P., 1967, Human performance in a cross-coupled tracking system. IEEE on H.F.E., vol. 8, no. 3, 210-231. (p. 217)
- Tustin, A., 1947, The nature of the operator's response in manual control, and its implications for controller design. J. Instit. Elect. Engres., 94, II A, 190-203.
- Verschoor, A.M., 1967, Systematische observatie van operatorfuncties in de procesindustrie; methode en enige resultaten. Ned. Tijdschr. Psychologie, 22, 289, 300.

- Vince, M.A., 1948, The intermittency of control movements and the psychological refractory period. *Brit. J. Psych.*, 38, 149-157.
- Welford, A.T., 1960, *Ergonomics of automation. Problems of progress in industry*, no. 8, London: H.M.S.O.
- Whitfield, D., 1967, Human Skill as a Determinate of Allocation of Function. In Singleton, W.T., et. al. (eds.), 1967, *The human operator in complex systems*. Taylor and Francis Ltd., London.
- Wilson, F.G., and Wilson, M.E., 1965, *Information, computers and system design*. John Wiley, New York. (p. 3)
- Young, L.R., 1969, On adaptive manual control. *Ergonomics*, vol: 12, no. 4, 635-675. (p. 672)
- Zadeh, L.A., and Desoer, C.A., 1963, *Linear system theory*. McGraw-Hill, New York. (p. 137 e.v.)
- Zadeh, L.A., and Polak, E., 1969, *System theory*. McGraw-Hill, New York.



## model M11 pp. T

bijlage: 1

NOTE	MODEL OF HUMAN/MACHINE SYSTEM	
NOTE	INPUT	
A	DIST1.K=(Q1)*(SIN(6.283*TIME.K/P1))	1.2
C	P1=25C	1.3
C	Q1=10	1.6
NOTE	ERROR SIGNAL	
A	ESIG1.K=DIST1.K+RESP1.K	1.7
A	LVAR1.K=ESIG1.K+LINK1.K	1.19
A	LINK1.K=0	1.20
NOTE	THIRD ORDER PROCESS	
NOTE	THIRD ORDER PROCESS	
R	SCR1.KL=(1/SAT)*(LVAR1.K-SVAR1.K)	1.8
C	SAT=40	1.9
L	SVAR1.K=SVAR1.J+(DT)*(SCR1.JK)	1.10
N	SVAR1=0	1.11
A	DIVAR1.K=SMOOTH(SVAR1.K,TC)	1.12
A	DZVAR1.K=SMOOTH(DIVAR1.K,TC)	1.13
C	TC=40	1.14
NOTE	INTERFACE HUMAN PROCESS	
A	ISVAR1.K=TABLE(VARTAB,DZVAR1.K,-10,10,2)	1.15
C	VARTAB*=-1C/-8/-6/-4/-2/0/2/4/6/8/10	1.16
NOTE		
A	RESP1.K=TABLE(RESPTAB,PRES1.K,-10,10,2)	1.17
C	RESPTAB*=-10/-8/-6/-4/-2/0/2/4/6/8/10	1.18
NOTE	OPERATOR PERCEPTION	
A	OVAR1.K=SAMPLE(ISVAR1.K,S1,Y)	2.1
C	S1=1	2.2
C	Y=0	2.3
R	PCVR1.KL=(1/PAT)*(OVAR1.K-PVAR1.K)	2.4
C	PAT=1	2.5
L	PVAR1.K=PVAR1.J+(DT)*(PCVR1.JK)	2.6
N	PVAR1=0	2.7
NOTE	PERCEIVED ERROR	
A	ERROR1.K=DESVAL1-PVAR1.K	2.8
C	DESVAL1=0	2.9
NOTE	PERCEIVED CHANGE OF ERROR	
A	RVAR1.K=SMOOTH(PVAR1.K,SMT)	2.10
C	SMT=4	2.11
A	RERR1.K=DESVAL1-RVAR1.K	2.12
A	CERR1.K=CLIP(EI1.K,EI2.K,ISVAR1.K,CRIT)	2.13
A	EI1.K=RERR1.K-ERROR1.K	2.14
A	EI2.K=ERROR1.K-RERR1.K	2.15
C	CRIT=0	2.16
NOTE	PERCEIVED INTEGRATED ERROR	
R	TCH1.KL=ERROR1.K	2.17
L	IE1.K=IE1.J+(DT)*(TCH1.JK)	2.18
N	IE1=0	2.19
NOTE		
NOTE	TASK STRESS	
A	DIR1.K=CLIP(POS,NEG,CERR1.K,0)	6.1
A	PROPSM1.K=(DIR1.K)*(AERR1.K)*(W)	6.4
C	W=.03	6.5
A	DIFSM1.K=(CERR1.K)*(SD1.K)	6.6
A	SD1.K=CLIP(SD11.K,1,CERR1.K,-.04)	6.7
A	SD11.K=CLIP(1,-1,CERR1.K,C)	6.8
R	SSCR1.KL=(PROPSM1.K)*(DIFSM1.K)*(1/STAT)	6.9
C	STAT=2	6.10
L	S1.K=S1.J+(DT)*(SSCR1.JK)	6.11
N	S1=.3	6.12

## bijiage: 1

A	TS1.K=MAX(C, S1.K)	6.13
NOTE		
NOTE	ACTION TRESHOLD	
A	AERROR1.K=MAX(ERROR1.K, -ERROR1.K)	5.1
A	ACTH1.K=CLIP(ACT, NOACT, AERROR1.K, CRIT1.K)	5.2
C	ACT=1	5.3
C	NOACT=C	5.4
NOTE	PULSE GENERATOR	
A	CRIT1.K=CLIP(0, .5C, PUL11.K, IC)	5.5
C	IC=4.1	5.6
R	PUL1.KL=(IP1.K)(AERROR1.K)	5.7
L	PUL11.K=PUL11.J+(OT)(PUL1.JK)	5.8
N	PUL11=C	5.9
A	IM1.K=CLIP(0, 1, PUL11.K, IC)	5.10
NOTE		
NOTE		
NOTE	DECISIONRULE	
NOTE	DECRUL SIN24	
A	DECRUL1.K=CLIP(DECRP1.K, DECRN1.K, CERR1.K, 0)	3.1
NOTE	DECISIONRULE FOR INCREASING ERROR	
A	DECRP1.K=CLIP(ACTP11.K, ACTION1.K, CERR1.K, DTHP1.K)	3.2
A	DTHP1.K=CLIP(.02, .07, TS1.K, .95)	3.3
A	ACTP11.K=CLIP(ACT1A.K, ACT1B.K, CERR1.K, PDTH1.K)	3.4
A	PDTH1.K=CLIP(.20, .32, TS1.K, .95)	3.5
NOTE	DECISIONRULE FOR DECREASING ERROR	
A	DECRN1.K=CLIP(ACTN11.K, ACTION1.K, ACERR1.K, DTHN1.K)	3.12
A	ACERR1.K=MAX(CERR1.K, -CERR1.K)	3.13
A	DTHN1.K=CLIP(.02, .17, TS1.K, .95)	3.14
A	ACTN11.K=CLIP(ACT1A.K, ACT1B.K, ACERR1.K, NDTH1.K)	3.15
A	NDTH1.K=CLIP(.02, .33, TS1.K, .95)	3.16
NOTE	CHOICES OF ACTION	
A	ACTION1.K=(G21.K)(ERROR1.K)	3.6
A	ACT1A.K=(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.7
A	ACT1B.K=(G21.K)(ERROR1.K)+(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.8
NOTE		
A	SIGN1.K=CLIP(NEG, FUS, ISVAR1.K, 0)	3.9
C	POS=1	3.10
C	NEG=-1	3.11
NOTE		
NOTE	WEIGHT OF CHANGE OF ERROR	
A	G31.K=CLIP(CRM1.K, RM1, TS1.K, .3)	3.17
C	RM1=8	3.18
A	CRM1.K=CLIP(CRMP1.K, CRMN1.K, CERR1.K, 0)	3.19
A	CRMP1.K=TABHL(CP1TAB, TS1.K, .3, 1.3, .1)	3.20
C	CP1TAB*=8/14/14/20.8/21.5/22.3/23.5/40/50/75/100	3.21
A	CRMN1.K=TABHL(CN1TAB, TS1.K, .3, 1.3, .1)	3.22
C	CN1TAB*=8/8/8/15/15/15/15/30/100/100/100	3.23
NOTE	WEIGHT OF ERROR	
A	G21.K=CLIP(G21P.K, G21N.K, CERR1.K, GTH1.K)	3.24
A	GTH1.K=CLIP(-.03, -.20, TS1.K, .95)	3.25
A	G21P.K=TABHL(S21PTAB, TS1.K, .3, 1.3, .1)	3.26
C	S21PTAB*=1/1.8/1.8/2.6/4.5/4.5/4.5/5.4/5.6/6	3.27
A	G21N.K=TABHL(S21NTAB, TS1.K, .3, 1.3, .1)	3.28
C	S21NTAB*=1.5/1.5/1.5/3/0/0/0/0/0/0	3.29
NOTE		
NOTE	OPERATOR RESPONSE	
A	DEC1.K=SMOOTH(DECRUL1.K, DELT1)	4.1
C	DECT1=2	4.2
A	RESP1.K=(ACTH1.K)(DEC1.K)	4.3

Bijlage: 1

A	ARESP1.K=MAX(RESPI.K,-RESPI.K)	4.4
A	FRESP1.K=CLIP(RANGE1.K,RESPI.K,ARESP1.K,10)	4.5
A	RANGE1.K=CLIP(10,-10,RESPI.K,0)	4.6
A	PRESP1.K=CLIP(FRESP1.K,DRESP1.K,CERR1.K,0)	4.7
A	DRESP1.K=CLIP(SRESP1.K,FRESP1.K,TS1.K,.95)	4.8
A	SRESP1.K=CLIP(SARESP1.K,SBRESP1.K,TS1.K,1.2)	4.9
A	SBRESP1.K=SMOOTH(FRESP1.K,SRT1.K)	4.10
A	SRT1.K=CLIP(6,45,ACERR1.K,.07)	4.11
A	SARESP1.K=SMOOTH(SBRESP1.K,SRT11.K)	4.12
A	SRT11.K=CLIP(4,20,ACERR1.K,.02)	4.13

## Beslissingsstrategie van

model M11 pp. J

bijlage: 2

NOTE	DECISIONRULE	
NCTE	DECRUL SIN24	
A	DECRUL1.K=CLIP(AC111.K,ACTION1.K,ACERR2.K,MAX(TV1,-TV1))	3.1
A	ACERR1.K=MAX(CEERR1.K,-CERR1.K)	3.2
C	TV1=.1	3.3
A	ACTION1.K=(G21.K)(ERROR1.K)	3.4
A	ACT11.K=CLIP(ACT1B.K,ACT1A.K,CERR1.K,-.4C)	3.5
A	ACT1A.K=(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.6
A	ACT1B.K=(G21.K)(ERROR1.K)+(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.7
A	G31.K=CLIP(CRM1.K,RM1,TS1.K,.3)	3.8
C	RM1=5	3.9
A	CRM1.K=CLIP(CRMP1.K,CRMN1.K,CERR1.K,0)	3.10
A	CRMP1.K=TABML(CP1TAB,TS1.K,0,5,1)	3.11
C	CP1TAB*=5/5/1C/10/10/10	3.12
A	CRMN1.K=TABML(CN1TAB,TS1.K,0,5,1)	3.13
C	CN1TAB*=0/0/1/2/2/2	3.14
A	G21.K=CLIP(G21P.K,G21N.K,CERR1.K,-.1)	3.15
A	G21P.K=TABML(S21PTAB,TS1.K,0,5,1)	3.16
C	S21PTAB*=1.8/1.8/2/2/2/2	3.17
A	G21N.K=TABML(S21NTAB,TS1.K,0,5,1)	3.18
C	S21NTAB*=1.8/1.8/2/2/2/2	3.19
NOTE		
A	SIGN1.K=CLIP(NEG,POS,ISVARI.K,0)	3.20
C	POS=1	3.21
C	NEG=-1	3.22
NOTE		
NOTE	OPERATOR RESPONSE	
A	DEC1.K=SMOOTH(DECRL1.K,DEC1.K)	4.1
A	DEC1.K=CLIP(4,8,TS1.K,.35)	4.2
A	RESP1.K=(ACTM1.K)(DEC1.K)	4.3
A	ARESP1.K=MAX(RESP1.K,-RESP1.K)	4.4
A	RANGE1.K=CLIP(10,-10,RESP1.K,0)	4.4
A	PRESPI.K=CLIP(RANGE1.K,RESP1.K,ARESP1.K,10)	4.6

## Beslissingsstrategie van

model M12 pp. T

bijlage: 3

NOTE	DECISIONRULE	
NOTE	DECRUL SIN36	
A	DECRUL1.K=CLIP(LDEC1.K, IDEC1.K, TS1.K, .33)	3.1
A	IDEC1.K=ACT1A.K	3.2
A	LDEC1.K=CLIP(ACT11.K, ACT12.K, PSCERR1.K, PRT1.K)	3.3
A	PRT1.K=CLIP(-10, 0, TS1.K, .36)	3.4
A	ACT12.K=(G21.K)(ERROR1.K)+(IG1.K)(PSCERR1.K)	3.5
A	IG1.K=CLIP(-2, 2, 2, (SVAR1.K, 0))	3.6
A	PSCERR1.K=SMOOTH(PCERR1.K, SPT)	3.7
C	SPT=18	3.8
R	ECH1.KL=(CERR1.K)(START1.K)	3.9
A	START1.K=CLIP(1, 0, TS1.K, .325)	3.10
L	PCERR1.K=PCERR1.J+(DT)(ECH1.JK)	3.11
N	PCERR1=0	3.12
A	ACERR1.K=MAX(CERR1.K, -CERR1.K)	3.13
A	ACT1A.K=(G21.K)(ERROR1.K)+(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.14
A	ACT11.K=CLIP(ACT1A.K, ACT1B.K, ACCFL1.K, 0)	3.15
A	ACT1B.K=CLIP(ACT1A.K, PCON1.K, TS1.K, UNT1)	3.16
A	PCON1.K=(G21.K)(ERROR1.K)	3.17
C	UNT1=.59	3.18
A	G31.K=CLIP(CRM1.K, RM1, TS1.K, .3)	3.19
C	RM1=12C	3.20
A	CRM1.K=CLIP(CRMP1.K, CRMN1.K, CERR1.K, 0)	3.21
A	CRMP1.K=TABML(CP1TAB, TS1.K, 0, .8, .1)	3.22
C	CP1TAB*=12C/120/120/120/130/100/100/100/100	3.23
A	CRMN1.K=TABML(CN1TAB, TS1.K, 0, .8, .1)	3.24
C	CN1TAB*=10C/100/100/100/140/60/30/20/20	3.25
A	G21.K=CLIP(G21P.K, G21N.K, CERR1.K, 0)	3.26
A	G21P.K=TABML(S21PTAB, TS1.K, 0, .5, .1)	3.27
C	S21PTAB*=6/6/6/6/3/2	3.28
A	G21N.K=TABML(S21NTAB, TS1.K, 0, .5, .1)	3.29
C	S21NTAB*=4/4/4/4/0/0	3.30
A	SCERR1.K=SMOOTH(CERR1.K, SIT)	3.31
C	SIT=4	3.32
A	ASCERR1.K=MAX(SCERR1.K, -SCERR1.K)	3.33
A	ACCEL1.K=ACERR1.K-ASCERR1.K	3.34
NOTE		
A	SIGN1.K=CLIP(NEG, POS, (SVAR1.K, 0))	3.35
C	NEG=-1	3.36
C	POS=1	3.37
NOTE		
NOTE		
NOTE	OPERATOR RESPONSE	
A	DEC1.K=SMOOTH(DECRUL1.K, DECT1.K)	4.1
A	DECT1.K=CLIP(4, BANG1.K, CERR1.K, .02)	4.2
A	BANG1.K=CLIP(80, 4, AERROR1.K, PROPT1.K)	4.3
A	PROPT1.K=CLIP(1, .5, TS1.K, .39)	4.4
A	RESP1.K=(ACTH1.K)(DEC1.K)	4.5
A	ARESP1.K=MAX(RESP1.K, -RESP1.K)	4.6
A	FRESP1.K=CLIP(RANGE1.K, RESP1.K, ARESP1.K, 10)	4.7
A	RANGE1.K=CLIP(10, -10, RESP1.K, 0)	4.8
A	PRESP1.K=CLIP(1, RESP1.K, FRESP1.K, TS1.K, .4)	4.9
A	SRESP1.K=CLIP(SBRESP1.K, SARESP1.K, TS1.K, .57)	4.10
A	SARESP1.K=SMOOTH(FRESP1.K, SRT1.K)	4.11
A	SRT1.K=CLIP(6, 30, ACERR1.K, .035)	4.12
A	SBRESP1.K=SMOOTH(SARESP1.K, SRT11.K)	4.13
A	SRT11.K=CLIP(2, 4, ACERR1.K, .07)	4.14

## Beslissingsstrategie van

model M12 pp. J

bijlage: 4

NOTE	DECISIONRULE	
NOTE		
NOTE	DECRUL SIN36	
A	DECRUL1.K=CLIP(LDEC1.K,IDECL.K,TS1.K,.40)	3.1
A	IDECL.K=ACT11.K	3.2
A	LDEC1.K=CLIP(ACT1CN1.K,ACT11.K,CERR1.K,0)	3.3
A	ACTION1.K=ACT11.K	3.4
A	ACT11.K=CLIP(ACT1A.K,ACT1B.K,CERR1.K,-.40)	3.5
A	ACT1A.K=(G21.K)(ERROR1.K)+(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.6
A	ACT1B.K=(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.7
A	G31.K=CLIP(CRM1.K,RM1,TS1.K,.3)	3.8
C	RM1=30	3.9
A	CRM1.K=CLIP(CRMP1.K,CRMN1.K,CERR1.K,0)	3.10
A	CRMP1.K=TABML(CP1TAB,TS1.K,0,.8,.1)	3.11
C	CP1TAB*=3C/3C/30/30/50/6G/60/60/60	3.12
A	CRMN1.K=TABML(CN1TAB,TS1.K,0,.8,.1)	3.13
C	CN1TAB*=5/5/5/5/5/5/60/60/60	3.14
A	G21.K=CLIP(G21P.K,G21N.K,CERR1.K,-.1)	3.15
A	G21P.K=TABML(S21PTAB,TS1.K,0,.6,.1)	3.16
C	S21PTAB*=5/5/5/5/5/6/6	3.17
A	G21N.K=TABML(S21NTAB,TS1.K,0,.6,.1)	3.18
C	S21NTAB*=3/3/3/3/3/2/G	3.19
NOTE		
A	SIGN1.K=CLIP(NEG,POS,(SVARI.K,0)	3.20
C	POS=1	3.21
C	NEG=-1	3.22
NOTE		
NOTE	OPERATOR RESPONSE	
NOTE		
A	DEC1.K=SMOOTH(DECRUL1.K,DECT1.K)	4.1
A	DECT1.K=CLIP(4,8,TS1.K,.35)	4.2
A	RESP1.K=(ACTM1.K)(DEC1.K)	4.3
A	ARESP1.K=MAX(RESPL1.K,-RESP1.K)	4.4
A	RANGE1.K=CLIP(10,-10,RESPL1.K,0)	4.5
A	PRESP1.K=CLIP(RANGE1.K,RESP1.K,ARESP1.K,10)	4.6

## Beslissingsstrategie van

model M10 pp. T

bijlage: 5

NOTE	DECISIONRULE	
A	ACERR1.K=MAX(CERR1.K,-CERR1.K)	3.1
A	DECRUL1.K=CLIP(DECRP1.K,DECRN1.K,CERR1.K,0)	3.2
A	DECRP1.K=CLIP(ACT11.K,ACTION1.K,ACERR1.K,TVP1)	3.3
C	TVP1=.04	3.4
A	DECRN1.K=CLIP(ACT11.K,ACTION1.K,ACERR1.K,TVN1.K)	3.5
A	TVN1.K=.02	3.6
A	ACTION1.K=(G11)*(IE1.K)+(G21.K)(ERROR1.K)	3.7
A	ACT11.K=(G11)*(IE1.K)+(G21.K)(ERROR1.K)+(G31.K)(CERR1.K)(SIGN1.K)	3.8
NOTE		3.8
C	G11=.02	3.9
A	G21.K=CLIP(G21P.K,G21N.K,CERR1.K,-.01)	3.10
A	G21P.K=TABML(S21PTAB,TS1.K,.3,.7,.1)	3.11
C	S21PTAB=.4,5/3.3/3.3/3.3/3.3	3.12
A	G21N.K=2.5	3.13
A	G31.K=CLIP(G31P.K,G31N.K,CERR1.K,0)	3.14
A	G31P.K=TABML(S31PTAB,TS1.K,0,.7,.1)	3.15
C	S31PTAB=.2C/2C/20/20/10/5/5/5	3.16
A	G31N.K=TABML(S31NTAB,TS1.K,0,.7,.1)	3.17
C	S31NTAB=.C/0/C/0/C/20/60/60	3.18
A	SIGN1.K=CLIP(NEG,POS,ISVAR1.K,0)	3.19
C	POS=1	3.20
C	NEG=-1	3.21
NOTE		
NOTE	OPERATOR RESPONSE	
A	DECT1.K=SMOOTH(DECRUL1.K,DECT1)	4.1
C	DECT1=1	4.2
A	RESP1.K=(ACTH1.K)(DECT1.K)	4.3
A	ARESP1.K=MAX(RESP1.K,-RESP1.K)	4.4
A	PRESPI.K=CLIP(RANGE1.K,RESP1.K,ARESP1.K,10)	4.5
A	RANGE1.K=CLIP(10,-10,RESP1.K,0)	4.6

## Beslissingsstrategie van

model M10 pp. J

NCTE	DECISIONRULE	
A	DECRUL1.K=ACTION1.K	3.1
A	ACTION1.K=(G11)*(IE1.K)+(G21.K)(ERROR1.K)	3.2
C	G11=.005	3.3
A	G21.K=CLIP(G21P.K,G21N.K,CERR1.K,C)	3.4
A	G21P.K=TABML(S21PTAB,TS1.K,0,1,.1)	3.5
C	S21PTAB=.1,7/1.7/1.7/1.7/1.7/2/2/2/2/2	3.6
A	G21N.K=TABML(S21NTAB,TS1.K,0,1,.1)	3.7
C	S21NTAB=.1/1/1/1/3/3/3/3/3/3/3	3.8
NCTE	OPERATOR RESPONSE	
A	DECT1.K=SMOOTH(DECRUL1.K,DECT1.K)	4.1
A	DECT1.K=CLIP(4,14,CERR1.K,0)	4.2
A	RESP1.K=(ACTH1.K)(DECT1.K)	4.3
A	ARESP1.K=MAX(RESP1.K,-RESP1.K)	4.4
A	RANGE1.K=CLIP(10,-10,RESP1.K,C)	4.5
A	PRESPI.K=CLIP(RANGE1.K,RESP1.K,ARESP1.K,10)	4.6

## bijlage: 6

NOTE	EYE FLIP FLOP	
A	LEFT.K=SWITCH(1,0,EYER.K)	7.1
R	IN1.KL=LEFT.K	7.2
L	INT1.K=INT1.J+(DT)*(IN1.JK-OUT1.JK)	7.3
N	INT1=15	7.4
A	X1.K=CLIP(C,1,INT1.K,ST1)	7.5
A	GATE2.K=CLIP(1,0,INT1.K,ST1)	7.6
C	ST1=10	7.7
R	IN22.KL=GATE2.K	7.8
L	INT22.K=INT22.J+(DT)*(IN22.JK-CUT22.JK)	7.9
N	INT22=C	7.10
R	OUT22.KL=(R)*(INT22.K)	7.11
C	R=1.5	7.12
A	GO2.K=CLIP(1,0,INT22.K,.8)	7.13
R	OUT2.KL=(INT2.K)(GO2.K)	7.14
A	EYEL.K=SWITCH(0,1,X1.K)	7.15
A	RIGHT.K=SWITCH(1,C,EYEL.K)	7.16
R	IN2.KL=RIGHT.K	7.17
L	INT2.K=INT2.J+(DT)*(IN2.JK-OUT2.JK)	7.18
N	INT2=0	7.19
A	X2.K=CLIP(0,1,INT2.K,ST2)	7.20
A	GATE1.K=CLIP(1,0,INT2.K,ST2)	7.21
C	ST2=9	7.22
R	IN11.KL=GATE1.K	7.23
L	INT11.K=INT11.J+(DT)*(IN11.JK-CUT11.JK)	7.24
N	INT11=0	7.25
R	OUT11.KL=(R)*(INT11.K)	7.26
A	GO1.K=CLIP(1,0,INT11.K,.8)	7.27
R	OUT1.KL=(INT1.K)(GO1.K)	7.28
A	EYER.K=SWITCH(0,1,X2.K)	7.29



Sinus periode 24 sec.

Factorladingen

Empirische data PP. T (variabelen 1 t/m 14)

bijlage: 7

VARIABLEN → FACTOREN

		Voor de respons		Voor de error	
		F 1	F 2	F 1	F 2
EEN - KANAAL	TM11	-.79	.36	.81	.18
	TM21	-.87	.20	.90	.18
	TM31	-.56	.26	.86	.21
	1	-.68	.41	.72	.17
	2	-.69	.62	.81	.11
	3	-.28	.77	.70	-.35
	4	-.32	.84	.51	-.67
TWEË - KANAALS NIET GEKOPPELD	5	-.43	.71	.69	-.44
	6	-.27	.75	.70	-.49
	TM211L	-.72	.32	.86	.18
	TM211R	-.74	.31	.88	.17
	TM212L	-.68	.29	.87	.21
	TM212R	-.76	.26	.86	.20
	7	-.60	.69	.73	-.47
TWEË - KANAALS GEKOPPELD	8	-.66	.51	.89	-.20
	9	-.58	.63	.76	-.19
	10	-.63	.59	.81	-.19
	TM21K	-.74	.42	.86	.01
	TM21K1L	-.53	.10	.83	.25
	TM21K1R	-.64	.17	.86	.21
	TM21K2L	-.58	.04	.84	.25
	TM21K2R	-.65	.17	.88	.20
	11	-.61	.65	.84	-.25
	12	-.57	.70	.81	-.27
	13	-.77	.47	.68	-.30
	14	-.79	.25	.84	-.02
	JM11	-.89	-.38	.87	.47
	JM21	-.76	-.35	.85	.49
	JM31	-.73	.57 x	.93	-.19 x
	JM211L	-.75	-.63	.80	.57
	JM211R	-.86	-.42	.85	.50
	JM212L	-.75	-.62	.79	.58
	JM212R	-.85	-.43	.85	.50
	JM21K	-.94	-.18	.95	.28
	JM21K1L	-.87	-.43	.90	.38
	JM21K1R	-.91	-.22	.93	.32
	JM21K2L	-.89	-.39	.91	.37
	JM21K2R	-.90	-.26	.92	.33

Verklaarde  
variantie  
per factor

.597

.171

Totaal .768

Sinus periode 24 sec.

Empirische data PP.J (1 t/m 14)

bijlage: 8

VARIABLEN → FACTOREN

	Voor de respons		Voor de error	
	F 1	F 2	F 1	F 2
1 JM11	-.90	-.39	.87	.49
2 JM21	-.76	-.37	.85	.51
3 JM31	-.72	.58 x	.92	-.21 x
4 1	-.82	-.52	.80	.59
5 2	-.95	.09	.90	.28
6 3	-.75	.51	.94	-.12
7 4	-.54	.61	.86	-.30
8 5	-.67	.63	.88	-.32
9 6	-.59	.66	.82	-.38
10 JM211L	-.75	-.63	.79	.59
11 JM211R	-.85	-.48	.85	.53
12 JM212L	-.75	-.62	.79	.60
13 JM212R	-.84	-.49	.85	.53
14 7	-.72	.57	.89	-.34
15 8	-.63	.68	.83	-.41
16 9	-.63	.71	.82	-.42
17 10	-.70	.64	.84	-.47
18 JM21K	-.95	-.17	.95	.28
19 JM21K1L	-.88	-.42	.91	.40
20 JM21K1R	-.92	-.26	.94	.32
21 JM21K2L	-.90	-.37	.91	.38
22 JM21K2R	-.89	-.31	.93	.34
23 11	-.79	.60	.90	-.40
24 12	-.70	.66	.86	-.44
25 13	-.94	.15	.96	-.07
26 14	-.94	.13	.96	-.03
27 TM11	-.80	.42	.81	.14
28 TM21	-.89	.21	.91	.16
29 TM31	-.57	.37	.86	.13
30 TM211L	-.70	.22	.86	.18
31 TM211R	-.72	.18	.87	.20
32 TM212L	-.67	.18	.87	.22
33 TM212R	-.75	.17	.86	.23
34 TM21K	-.76	.50	.87	-.06
35 TM21K1L	-.57	.31	.83	.16
36 TM21K1R	-.66	.31	.87	.11
37 TM21K2L	-.62	.26	.85	.15
38 TM21K2R	-.67	.31	.88	.10

Verklaarde  
variantie  
per factor

.677

.162

Totaal

.839

VARIABELEN → FACTOREN

↓	Voor de respons			Voor de error		
	F 1	F 2	F 3	F 1	F 2	F 3
1 TM12	-.71	-.06	.36	.75	.31	.08
2 TM22	-.86	.06	-.22	.88	.01	.25
3 1	-.43	.44	.32	.70	-.18	-.04
4 2	-.64	-.02	.66	.76	-.31	-.16
5 3	-.52	-.01	.69	.80	.09	-.40
6 4	-.63	.33	.31	.77	-.36	-.05
7 TM121L	-.83	.31	-.07	.79	-.13	.32
8 TM121R	-.66	.56	-.15	.69	-.39	.21
9 TM122L	-.65	-.51	-.04	.78	.50	.26
10 TM122R	-.71	-.53	.13	.73	.53	.24
11 5	-.76	-.12	.42	.71	.27	.02
12 6	-.72	-.29	.24	.86	.12	.07
13 7	-.60	.65	-.13	.74	-.41	.34
14 8	-.40	.76	-.25	.64	-.33	.46
15 TM12K	-.71	-.41	.17	.80	.35	.06
16 TM12K1L	-.66	-.41	-.08	.75	.47	.23
17 TM12K1R	-.65	-.43	-.05	.75	.51	.26
18 TM12K2L	-.66	-.36	-.29	.72	.48	.30
19 TM12K2R	-.55	-.45	-.15	.70	.49	.33
20 9	-.65	-.06	.53	.42	.18	-.15
21 10	-.67	-.02	.51	.82	.06	-.11
22 11	-.57	-.23	.40	.81	.29	-.06
23 12	-.40	.38	-.41	.51	-.24	.61
24 JM12	-.87	.19	.14	.96	-.13	.08
25 JM22	-.87	-.05	-.33	.88	.04	.31
26 JM121L	-.80	.44	-.03	.92	-.24	.19
27 JM121R	-.81	.19	.29	.96	-.14	.06
28 JM122L	-.79	.43	.04	.92	-.24	.19
29 JM122R	-.80	.19	.22	.95	-.19	.10
30 JM12K	-.87	.22	.26	.98	-.11	-.05
31 JM12K1L	-.72	.21	.24	.95	-.05	.01
32 JM12K1R	-.53	.21	.47	.94	-.06	.05
33 JM12K2L	-.91	.02	.07	.96	-.07	.01
34 JM12K2R	-.54	.22	.40	.94	-.09	.05

Verklaarde  
variantie  
per factor

.570

.102

.077

Totaal .749

VARIABLEN → FACTOREN

	Voor de respons		Voor de error	
	F 1	F 2	F 1	F 2
1 JM12	-.90	.21	.98	-.04
2 JM22	-.87	-.21	.88	.20
3 1	-.81	.40	.93	-.20
4 2	-.77	.17	.89	-.15
5 3	-.74	.21	.80	-.03
6 4	-.79	.21	.93	-.05
7 JM121L	-.85	.34	.95	-.10
8 JM121R	-.83	.25	.98	-.05
9 JM122L	-.84	.31	.95	-.10
10 JM122R	-.84	.26	.97	-.09
11 5	-.79	.38	.85	.07
12 6	-.86	.17	.86	.02
13 7	-.83	.44	.88	-.22
14 8	-.90	.23	.87	-.04
15 JM12K	-.88	.17	.97	-.00
16 JM12K1L	-.72	.14	.93	.09
17 JM12K1R	-.52	.18	.91	.11
18 JM12K2L	-.87	-.09	.94	.07
19 JM12K2R	-.53	.15	.92	.09
20 9	-.88	.43	.91	-.30
21 10	-.81	.48	.91	-.16
22 11	-.93	.15	.90	.08
23 12	-.87	.34	.70	-.15
24 TM12	-.65	-.10	.67	.45
25 TM22	-.90	-.07	.90	.14
26 TM121L	-.86	.16	.80	.09
27 TM121R	-.70	.35	.72	-.20
28 TM122L	-.59	-.62	.72	.65
29 TM122R	-.63	-.56	.66	.66
30 TM12K	-.64	-.39	.75	.40
31 TM12K1L	-.62	-.57	.71	.60
32 TM12K1R	-.61	-.54	.70	.64
33 TM12K2L	-.64	-.47	.68	.59
34 TM12K2R	-.51	-.49	.64	.59

Verklaarde  
variantie  
per factor

.664

.103

Totaal .767

BIJLAGE 11De structuur van het systeemmodel volgens  
Forrester (1961, 1968)

Forrester gebruikt systeemstructuur-concepten die overeenkomen met de systeemvariabelen die we in par. 2.6 hebben besproken. Hij hanteert de volgende hiërarchie (Forrester, 1968) uitgaande van een gesloten systeem, d.w.z. het systeemgedrag is niet afhankelijk van de omgeving en enkel afhankelijk van wat er zich binnen het systeem afspeelt.

De hiërarchie ziet er als volgt uit:

#### Het gesloten systeem

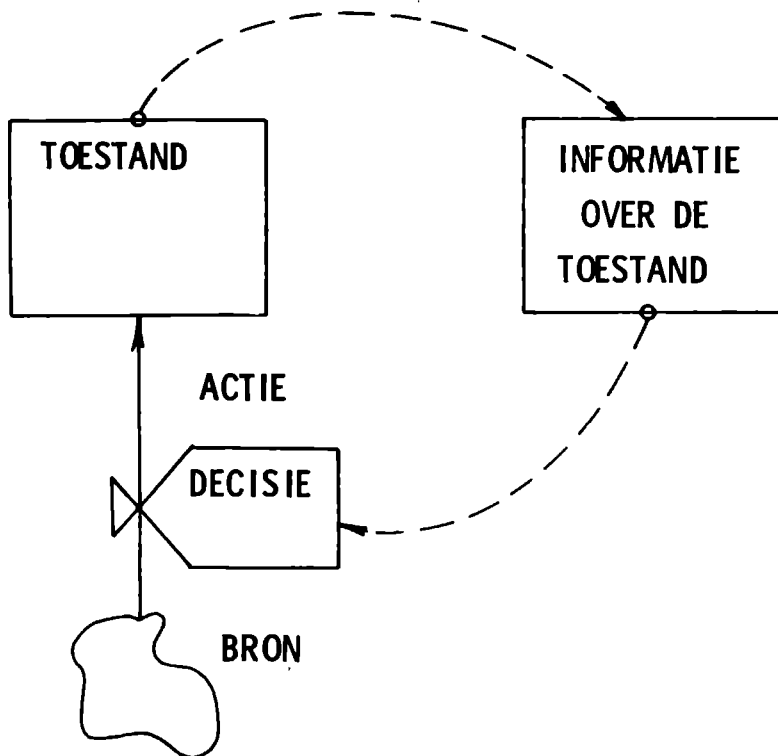
I De feedback loop als elementair element door middel waarvan systemen worden samengesteld.

1. Toestandvariabelen (levels) als een fundamentele variabele binnen de feedback loop.
2. Regelvariabelen (rates) als het andere type dat fundamenteel is in de feedback loop.
  - a. Het doel als een component van de decisievariabele. Deze voorstelling van de doelvariabele gaat alleen op voor wat betreft het schrijven van de vergelijkingen in DYNAMO. DYNAMO is een taal die voor deze aanpak is ontwikkeld.
  - b. De waargenomen toestand die met het doel vergeleken wordt.
  - c. De discrepantie tussen doel en waargenomen doel.
  - d. De actie als resultaat van die discrepantie.

Bij de bestudering van systemen als oorzaak van dynamisch gedrag, wordt de aandacht vooral gericht op de interacties binnen het systeem, die groei, fluctuatie en verandering te weeg brengen. Elk specifiek

gedrag moet het gevolg zijn van combinatie van interagerende componenten. Deze componenten maken deel uit van het systeem.

### 1.1 De feedback loop als structureel element



**FIG. 1.1 STRUCTUUR VAN DE FEEDBACK LOOP**

In het systeem is de voornaamste bouwsteen de feedback loop. Forrester (1968) definieert deze als volgt:

"The feedback loop is a path coupling decision, action, level (or condition) of the system, and information, with the path returning to the decision point."

De structuur van de lus ziet er als volgt uit (zie fig. 1.1 op blz. 285)

Het begrip "decisie" moet men opvatten in abstracte zin. Het houdt meer in dan alleen het beslissen door mensen. Het kan een menselijke beslissing zijn, expliciet of impliciet, het kan een beslissing zijn die een biologische ontwikkeling stuurt. Het kan ook een regelklep zijn in een chemische fabriek. Steeds is de beslissing gebaseerd op de beschikbare informatie.

De decisie stuurt een actie die de toestand van het systeem beïnvloedt en nieuwe informatie komt ter beschikking die de decisiestroom wijzigt.

Een systeem kan bestaan uit een feedback loop of uit meerdere lussen die elkaar insluiten. Forrester heeft simulatiemodellen ontwikkeld die bestaan uit honderd en meer toestandvariabelen.

## 1.2 Toestand- en regelvariabelen

Een systeemmodel kan worden samengesteld door feedback loops aan elkaar te koppelen. Elke lus bestaat uit een substructuur. De twee belangrijkste typen variabelen binnen elke lus, zijn de toestand- en de regelvariabele. Beide zijn noodzakelijke en voldoende voorwaarde voor het samenstellen van de lus.

We zijn in par. 2.6.4 uitvoerig ingegaan op de toestandvariabele en volstaan nu met enkele korte opmerkingen. De toestandvariabele accumuleert de acties die door de regelvariabelen worden bepaald. De toestandvergelijkingen hebben de vorm van integralen. De regelvariabelen tonen hoe snel de toestandvariabelen veranderen, ze bepalen de verandering per tijdseenheid. De waarde van de beslissingsvariabele wordt

berekend door de waarden van de toestandvariabelen en constanten te gebruiken.

De toestandvariabelen zijn onafhankelijk van elkaar, in die zin, dat ze in de structuur niet direct aan elkaar gekoppeld zijn. Toestandvariabelen kunnen slechts elkaar beïnvloeden via het volgende pad, bijvoorbeeld: toestandvariabele (1) --- regelvariabele (2) --- actie (2) --- toestandvariabele (2). (Zie fig. 1.2).

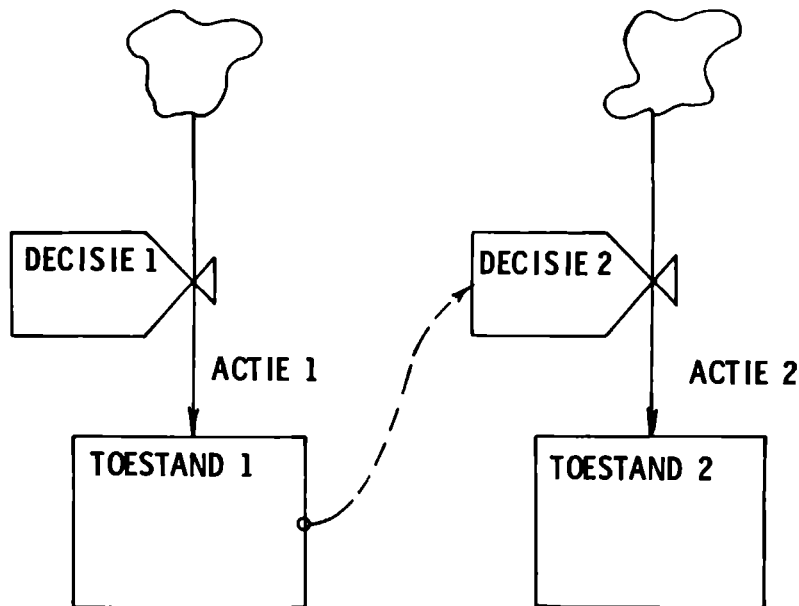


FIG. 1.2      RELATIE TUSSEN TWEE TOESTANDVARIABLEN

Volgens Forrester (1968) is het gedrag van natuurlijke processen zodanig dat regelvariabelen elkaar,



niet direct beïnvloeden. De actiestroom wordt hier beschouwd als een instantane verandering en niet als een gemiddelde over een bepaalde periode. De regelvariabelen kunnen elkaar niet direct beïnvloeden, omdat ze enkel van invloed zijn op de toestandvariabelen. Decisie 1 kan in fig. 1.2 alleen als onafhankelijke variabele voor decisie 2 optreden via toestand 1.

De actiestromen kunnen niet instantaan gemeten worden, elke meting kost tijd en wat gemeten wordt is de gemiddelde verandering over een zekere periode. In sociale systemen zien we evenzo dat het enige tijd duurt voordat we een verandering kunnen waarnemen. De regelvariabele en de toestandvariabele zijn van dezelfde dimensie of meeteenheid. In een model zijn ze slechts te onderscheiden door de actie in het systeem stop te zetten. De regelvariabele die een verandering, dus actie, weergeeft, houdt op te bestaan en wat overblijft is de toestandvariabele. Wanneer men bijvoorbeeld een leerproces stop zet, is wat overblijft als waarneembare grootte, de opgedane kennis.

Regelvariabelen zijn afhankelijk van toestandvariabelen en constanten. De regelvergelijkingen zijn algebraïsch van vorm en ze bepalen geen tijd of oplossingsinterval, ze zijn niet afhankelijk van hun vroegere waarden.

Zoals we reeds gezien hebben in fig. 1.2 zullen in de structuur van een feedbacksysteem toestand- en regelvariabelen alterneren. Voor het bepalen en het beschrijven van de conditie van het systeem, zijn enkel de toestandvariabelen van belang. Men dient de begincondities te kennen om het systeem stapsgewijze te kunnen beschrijven.

### 1.3 Doel, waarneming, discrepantie, actie, als sub- substructuur van de regelvariabele

Voor het berekenen van de regelvariabele, de regelvergelijking, is het gebruik van vier concepten nodig:

- 1 het doel
- 2 een waargenomen conditie van het systeem
- 3 een manier om de discrepantie tussen doel en waargenomen toestand uit te drukken
- 4 een formulering hoe de actie afhangt van deze discrepantie.

Dit kan men als volgt weergeven: (zie fig. 1.3)

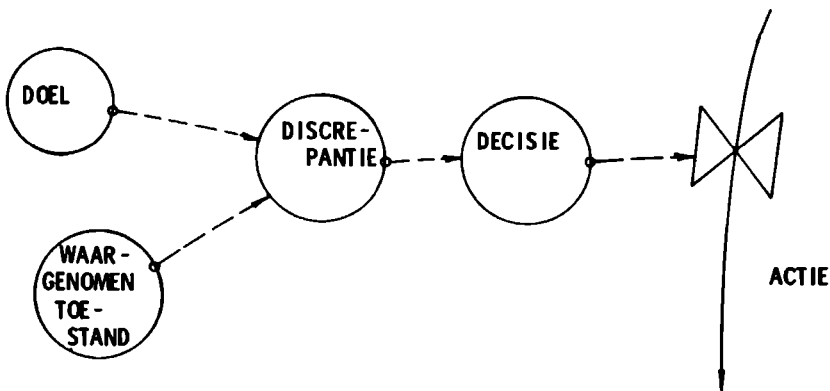


FIG. 1.3 SUB - SUBSTRUCTUUR VAN DE REGELVARIABLE

Wanneer we te maken hebben met een negatieve terugkoppeling, is het doel datgene waarnaar de toestand zich richt. De regelvergelijking creëert een actie die de toestand van het systeem naar het doel tracht te brengen.

In een positieve lus is het doel datgene waar het

systeem zich steeds verder van verwijdt in een toenemende groei.

Temperatuurregeling is bijvoorbeeld op te vatten als een negatieve lus. Hoe lager de buitentemperatuur, des te meer hitte zal men toevoeren om de kamertemperatuur op een gegeven waarde te houden.

Een leerproces kan men opvatten als een positieve lus. Naarmate men meer weet, des te sneller leert men nieuwe stof. Het sneeuwbal-effect of een kernreactie zijn andere voorbeelden van positieve terugkoppeling.

#### 1.4 Vergelijkingen en berekeningen

Voor het berekenen van de achtereenvolgende stappen in het dynamisch gedrag van een systeem, is een gestandaardiseerde opeenvolging nodig van berekenen en een terminologie, die gebruikt kan worden om de procedure aan te geven.

De wijze van berekenen vindt stapsgewijze voortgang zoals is aangegeven in fig. 1.4.

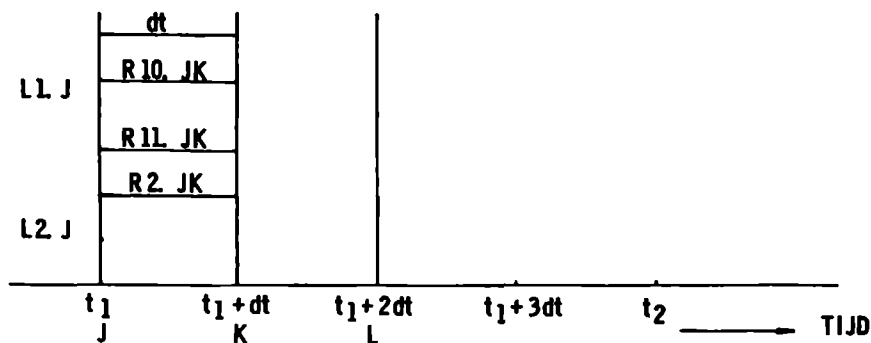


FIG. 1.4 STAPSGEWIJZE VOORTGANG VAN DE BEREKENING

Stel, we gaan uit van het tijdstip  $t_1$ , d.w.z. alle berekeningen tot dat tijdstip zijn uitgevoerd, en we willen de toestand van het systeem berekenen op het volgende tijdstip  $t_1 + dt$  (N.b. Het symbool "dt" geeft aan de duur van het interval tussen de berekeningen.)

De tijdstippen  $t_1$  en  $t_2$  geven de tijdseenheid aan die in het systeem gebruikt wordt, bijvoorbeeld een seconde, of een week, of een jaar. Het oplossingsinterval  $dt$  hoeft echter niet met het tijdsinterval overeen te stemmen.

Op de wijze waarop het oplossingsinterval  $dt$  wordt bepaald, zullen we nog terug komen.

Voor het toekennen van tijdsuffixen aan de variabelen, gelden de volgende afspraken. Het tijdstip  $K$  duidt aan de plaats in de tijd waarop de betreffende berekening van toepassing is. Daarmee in overeenstemming is  $J$  het tijdstip dat er net aan voorafging, en  $L$  het tijdstip dat volgt op  $K$ . De vergelijkingen zijn zodanig van aard dat geen enkel ander tijdstip nodig is voor het uitvoeren van berekeningen. De berekening is volledig vastgelegd door het tijdstip  $J$ , het interval  $JK$ , het tijdstip  $K$ , en het interval  $KL$ .

Wanneer we waarden van de toestandvariabelen  $L1$  en  $L2$  (van LEVEL) willen bepalen op het tijdstip  $K$ , gaan we uit van de waarden die deze hadden op het tijdstip  $J$  en voegen daaraan toe, of verminderen ze met wat er binnen- respectievelijk uitstroomt.

Wanneer we bijvoorbeeld aannemen dat  $R10.JK$  de hoeveelheid is die gedurende het interval uit  $L1$  wegstroomt en  $R11.JK$  de hoeveelheid die er binnenstroomt, dan is de waarde van de toestandvariabele  $L1$  op het tijdstip  $K$  aangegeven met  $L1.K$  gelijk aan:

$$L1.K = L1.J + (DT)(R11.JK - R10.JK) \quad (1.1)$$

(Het symbool  $R$  is afkomstig van RATE).

De actiestroom  $R2$  is een binnenkomende stroom voor toestandvariabele  $L2$ .

Op overeenkomstige wijze als in vergelijking 1.1 wordt de waarde van de toestandvariabele L2 op het tijdstip K:

$$L2.K = L2.J + (DT)(R2.JK) \quad (1.2)$$

Op het tijdstip K ziet de situatie zoals ze in fig. 1.4 geschetst is, er als volgt uit: (zie fig. 1.5)

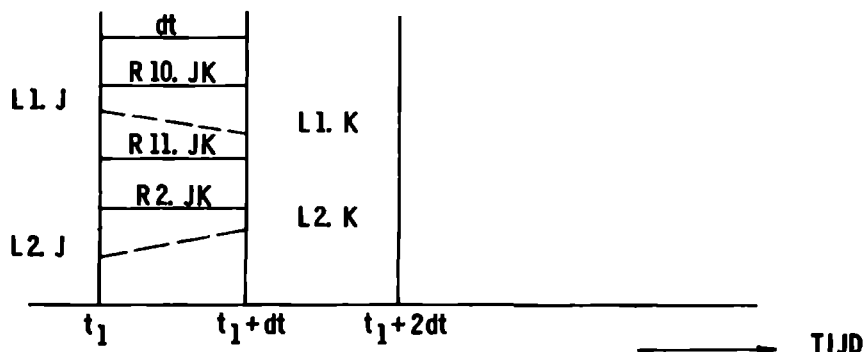


FIG. 1.5 STAPSGEWIJZE VOORTGANG VAN DE BEREKENING

Wanneer we alle waarden van de toestandvariabelen op het tijdstip K bepaald hebben, moeten we vervolgens kunnen berekenen welke de veranderingen zullen zijn gedurende het tijdinterval KL om met de stapsgewijze berekening te kunnen voortgaan.

Stel dat de actiestromen of de veranderingen van R10, R11 en R2 bepaald zijn.  
(Zie fig. 1.6)

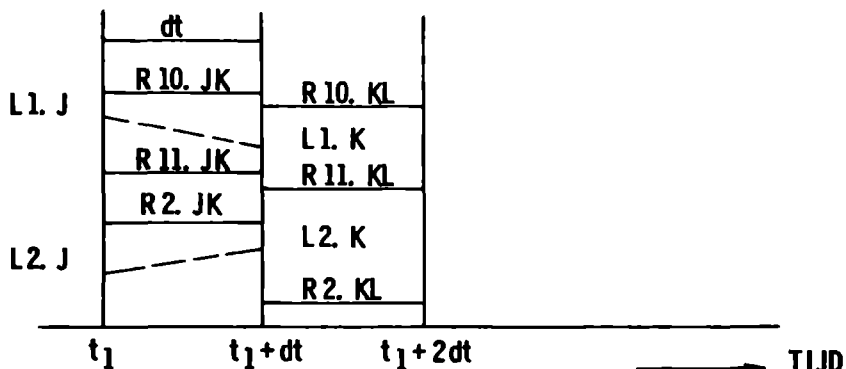


FIG. 1.6 STAPSGEWIJZE VOORTGANG VAN DE BEREKENING

Wat de berekening betreft zijn we nu in dezelfde situatie als toen we begonnen met  $t_1$ . Willen we vervolgens bepalen welke waarde de toestandvariabelen hebben op het tijdstip  $t_1 + 2dt$ , dan wordt dit tijdstip het nieuwe tijdstip K in de berekening, d.w.z. J, K en L schuiven ieder een tijdstip verder. (Zie fig. 1.7)

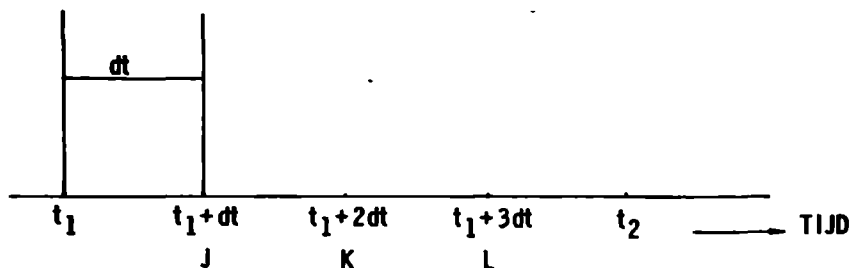


FIG. 1.7 STAPSGEWIJZE VOORTGANG VAN DE BEREKENING

Wanneer we starten met tijdstip  $t_0$  zijn de regelvergelijkingen niet ter zake. De regelvariabelen met betrekking tot het tijdsinterval  $t_0 + dt$  worden bepaald aan de hand van de beginconditie van de toe-

standvariabelen.

Te beginnen met  $t_0$  is de volgorde van berekenen eerst het vaststellen van de acties en dan het bepalen van de waarde van de levels. Na deze eerste stap worden de toestandvariabelen bepaald en vervolgens de regelvariabelen, die de acties bepalen.

Zoals we in vergelijking 1.1 en 1.2 reeds hebben laten zien, ziet de algemene toestandvergelijking er als volgt uit. (Omdat Forrester ze aangeeft met de naam "Level" zullen we het symbool  $L$  gebruiken.)

### 1.5 De toestandvergelijking

$$L.K = L.J + (DT)(IN.JK - UIT.JK) \quad (1.3)$$

$L$	: toestand (eenheden)
$L.K$	: de nieuwe waarde van de toestandvariabele op tijdstip $K$ (eenheden)
$L.J$	: de waarde van de toestandvariabele op het voorgaande tijdstip (eenheden)
$DT$	: de lengte van het oplossingsinterval tussen tijdstippen $J$ en $K$ (tijdmaat)
$IN$	: invoer
$IN.JK$	: de waarde van de invoer gedurende het tijdinterval $JK$ (eenheden/tijdmaat)
$UIT$	: uitvoer, negatieve verandering
$UIT.JK$	: de waarde van de uitvoer (eenheden/tijdmaat)

De dimensie van deze vergelijking is:

$$(\text{Eenheden}) = (\text{Eenheden}) + (\text{tijdmaat})(\text{Eenheden/tijdmaat})$$

Een toestandvariabele kan afhankelijk zijn van meerdere veranderingen, positief of negatief. Deze komen dan alle in het rechterlid van de vergelijking te staan en worden vermenigvuldigd met het oplossingsinterval  $dt$ .

De meest algemene vorm van de toestandvergelijking is

de integraal:

$$L = L_0 + \int_{t_0}^t (IN - UIT) dt \quad (1.4)$$

### 1.5.1 De regelvergelijking

De regelvergelijkingen bepalen hoe de acties, of veranderingen, in het systeem gestuurd worden. De regelvergelijking wordt berekend op het tijdstip K en heeft betrekking op het interval KL.

De regelvariabele of decisievariabele is, zoals we in par. 1.2 reeds hebben aangeduid, afhankelijk van de toestandvariabele en constanten.

$$R.KL = f(\text{toestandvariabelen en constanten}) \quad (1.5)$$

Zoals we reeds eerder hebben vermeld moet de decisievariabele in abstracte zin worden opgevat. In de regel- of decisievergelijking wordt geformuleerd hoe we menen dat in het onderzochte systeem, de decisies de reacties zijn op de omringende omstandigheden.

### 1.5.2 De hulpvergelijking

Vaak is het raadzaam een regelvergelijking op te splitsen in delen, die als afzonderlijke vergelijkingen kunnen worden geschreven. Dit is vaak het geval wanneer de regelvergelijking complex is. Dit opsplitsen in wat dan heet hulpvergelijkingen, maakt de regelvergelijking inzichtelijker. De hulpvariabele is afhankelijk van de toestandvariabele en fungeert als onafhankelijke variabele voor de regelvariabele.

De volgorde van bewerkingen is: toestandvergelijking, hulpvergelijking en regelvergelijking. Hulpvariabelen kunnen afhankelijk zijn van andere hulpvariabelen. Voor een meer gedetailleerd inzicht in de wijze waar-



op parameters en andere functies geschreven worden, die van belang zijn voor het maken van het computerprogramma, verwijzen we naar de DYNAMO-handleiding (Pugh III, A.L., 1963).

### 1.6 Het oplossingsinterval

Bij het kiezen van het oplossingsinterval DT moet men er op letten dat dit interval niet of te groot of te klein is. Wanneer het te groot is, gedraagt het systeem zich instabiel, enkel en alleen door de wijze van berekenen.

Is het interval te klein, dan worden de berekeningen onnodig vaak uitgevoerd, wat extra computertijd kost. Als vuistregel wordt daarom het oplossingsinterval als volgt bepaald (Forrester, 1961, 1968). In elk model moet het oplossingsinterval DT kleiner zijn dan de helft van de kortste exponentiële looptijd van de eerste orde (first-order-delay) en groter of gelijk aan een vijfde van deze looptijd van de eerste orde, die in het model voorkomt.

$$\frac{1}{5} T_c \leq DT < \frac{1}{2} T_c \quad (1.6)$$

$T_c$  = tijdconstante van eerste orde systeem

De tijdconstante is een maat voor de volgsnelheid van een systeem. Voor de stapresponsie van een systeem is de tijdconstante het tijdstip waarop de eindwaarde tot op een fractie

$$\frac{1}{e} = .37 \text{ is benaderd.}$$

### 1.7 Stroomdiagrammen

Naast het beschrijven van een systeem en het opzetten van vergelijkingen, worden ook stroomdiagrammen gebruikt. Deze tonen vooral de structuur van het systeem met al zijn lussen. Een stroomdiagram heeft het voor-

deel dat men een goed inzicht krijgt in het systeem, zonder dat men direct in detail hoeft te treden over de aard van de samenhang tussen de verschillende variabelen. Uit een stroomdiagram is gemakkelijk af te lezen hoe toestand- en regelvariabelen samen een lus vormen en hoe de verschillende lussen aan elkaar gekoppeld worden, en zo het systeem vormen. In het stroomdiagram kan men toestand-, regel- en hulpvariabelen en hun samenhang onderkennen (Forrester, 1961, 1968).

Toestandvariabelen en andere variabelen die betrekking hebben op integratie, worden aangegeven door rechthoeken. De in- en uitvoer van de toestandvariabele, het symbool dat de variabele voorstelt bijvoorbeeld (L1) en het nummer van de vergelijking als referentie naar de vergelijking in de formele notatie, worden als volgt weergegeven, bijvoorbeeld: fig. 1.7.1.

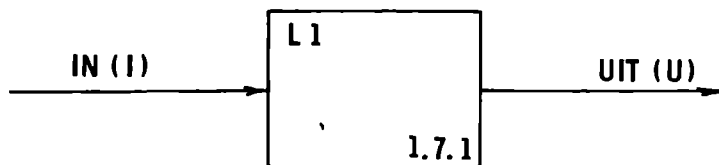


FIG. 1.7.1 STROOMDIAGRAM VAN DE TOESTANDVARIABLE

$$L1.K = L1.J + (DT)(I.JK - U.JK) \quad (1.7.1, L)$$

De regelvariabele wordt aangegeven als een symbool van een regelklep. Het symbool moet de lettergreep bevatten die de regelvariabele voorstelt, het nummer van de vergelijking en de informatie-invoer waar de regelvariabele van afhangt. Bijvoorbeeld: zie fig. 1.7.2.

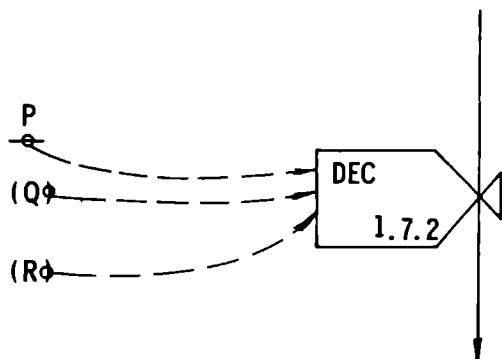


FIG 1.7.2 STROOMDIAGRAM VAN DE REGELVARIABLE

$$\text{DEC.KL} = \frac{Q \cdot K}{P} \cdot (R \cdot K) \quad (1.7.2, R)$$

De hulpvariabele, die in de informatiekanaal ligt tussen de toestand- en regelvariabele, wordt aangegeven met een cirkel. Het symbool bevat de cirkel, de afkorting van de variabele, het nummer van de vergelijking en de invoer en uitvoer van informatiestroom. Bijvoorbeeld: zie fig. 1.7.3.

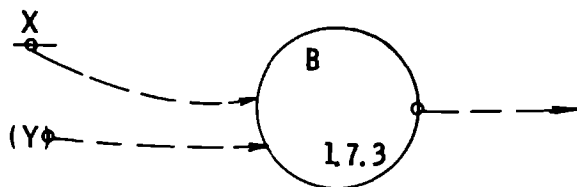


FIG. 1.7.3 STROOMDIAGRAM VAN DE HULPVARIABLE

$$B.K = (Y.K)(X) \quad (1.7.3,A)$$

De symbolen L, R en A achter het nummer van de vergelijking zijn afkomstig van "Level" (= toestand), "Rate" (= regel of decisie) en "Auxiliary" (= hulpvariabele).

Omdat we in ons onderzoek gebruik gemaakt hebben van een analoge rekenmachine is het energie-netwerk een elektrische stroom, die in het model wordt aangegeven met een getrokken lijn. De stippellijnen in het stroomdiagram van het model stellen informatiestromen voor.

Forrester (1961) onderscheidt in zijn modellen zes netwerken die onderling samenhangen, deze zijn:

- het materiaal netwerk
- het order netwerk
- het geld netwerk
- het personeelsnetwerk
- het kapitaal goederen netwerk
- het informatienetwerk dat alle voorgaande netwerken verbindt.

Met behulp van deze netwerken bestudeert hij het dynamisch gedrag van sociale systemen, daarbij rekening houdend met de interacties tussen deze netwerken.

Parameters worden afgekort weergegeven. Deze afkorting wordt onderstreept en de lijn is het vertrekpunt voor het informatie kanaal. (Bijvoorbeeld P)

Wanneer het beginpunt of het eindpunt van een stroom niet van invloed zijn op het systeem, dus wanneer ze de grens van het model overschrijden, wordt gebruik gemaakt van respectievelijk een bron (source) en put (sink). Zie fig. 1.7.4.

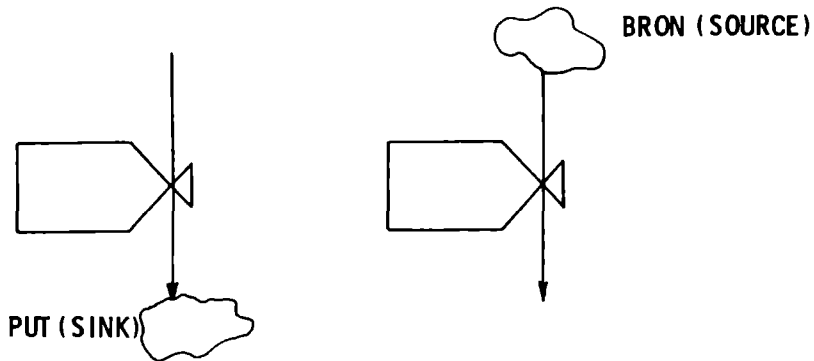


FIG. 1.7.4 BEGIN- EN EINDPUNT VAN EEN STROOM

Het stroomdiagram van een systeem kan over vele pagina's uitgestreken zijn. De samenhang met andere stukken van het model wordt dan als volgt aangegeven. Bij begin- en eindpunt wordt aangegeven de afkorting van de variabele, het nummer van de vergelijking en de soort vergelijking. (Zie fig. 1.7.5)

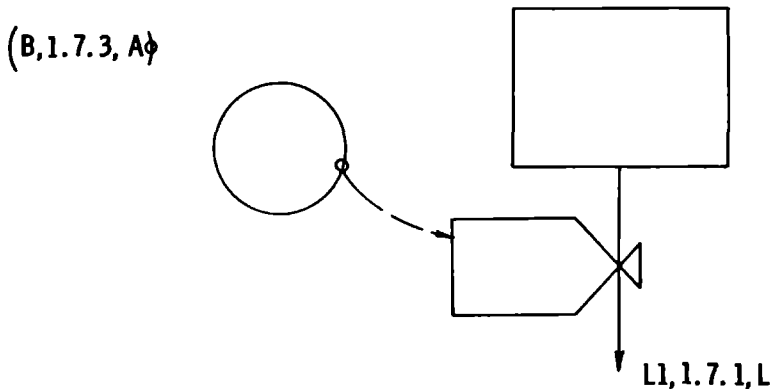


FIG. 1.7.5 SAMENHANG MET ANDERE DELEN VAN HET MODEL

BIJLAGE 12

Algemene wiskundige notatie voor een aantal vergelijkingen zoals ze in DYNAMO programmeertaal worden geschreven. (Zie DYNAMO II Users Manual. Pugh III, A.L., 1963)

## 1. De toestandvergelijking (LEVEL-EQUATION)

$$\underline{L.K = L.J + (DT)(P.JK - Q.JK)}$$

L = LEVEL

P = INPUT

Q = OUTPUT

Deze vergelijking kan als volgt worden gelezen:

$$L(t) = L(o) + \int_0^T (\dot{P} - \dot{Q})dt$$

DYNAMO kent ingebouwde functies en macros, we hebben in ons model van de volgende gebruik gemaakt.

2. V = STEP (P,Q)

V = de beginwaarde indien  $t < Q$

V = P indien  $t \geq Q$

3. V = (Q)(SIN(6.283 \* TIME.K/P))

Q = amplitude van de sinus

P = de periode van de sinus

4. V = SAMPLE (X, SI, BG)

X = de variabele die gesampled wordt  
 SI = het sample interval  
 BG = beginwaarde van het sample

### 5. V = CLIP (P,Q,R,S)

V = P    indien     $R \geq S$   
 V = Q    indien     $R < S$

### 6. V = MAX (P,Q)

V = P    indien     $P \geq Q$   
 V = Q    indien     $P < Q$

### 7. DE INTERPOLATIE-FUNCTIE

V = TABLE (TAB, P, N1, N2, N3)

TAB - Naam van de table  
 P    - onafhankelijke variabele  
 N1   - de laagste waarde van de onafhankelijke  
       variabele  
 N2   - de hoogste waarde van de onafhankelijke  
       variabele  
 N3   - de increment van de onafhankelijke varia-  
       bele.

Bijv. de relatie tussen het uitgangssignaal van het proces en de wijzerstand in het model (zie verg. 1.15 en 1.16 en fig. 5.4a). (TABHL betekent dat de onafhankelijke variabele de hoogste en laagste aangegeven grenzen mag overschrijden.)

### 8. V = SMOOTH (P, ST)

De SMOOTH-functie is een macro; ze stelt een eenvoudig eerste-orde negatief feedbacksysteem voor.

V = de output van het systeem  
P = de input  
ST = de tijdconstante van het systeem.



LIJST VAN MODELAFKORTINGEN

## Model:

- M10 : Model aangepast aan data van de stap-input; staphoogte van 9 Volt.
- M20 : Model aangepast aan data van de stap-input; staphoogte van 7 Volt.
- M11 : Model aangepast aan data van de sinus-input met een periode van 24 sec. en een amplitude van 10 Volt.
- M21 : Model aangepast aan data van de sinus-input met een periode van 24 sec. en een amplitude van 7 Volt.
- M22 : M21 met een sinus-input met een periode van 36 sec.
- M12 : Model aangepast aan data van de sinus-input met een periode van 36 sec. en een amplitude van 7 Volt.
- M31 : M12 met een sinus-input met een periode van 24 sec. en een amplitude van 7 Volt.
- M211L : Model 21, computer run 1, van Linkerkanaal met data van oogbewegingen.
- M211R : Model 21, computer run 1, van Rechterkanaal met data van oogbewegingen.
- (M212L en M212R : idem run 2)
- M21K : M21 met koppeling tussen beide kanalen.
- M21K1L : M21K, computer run 1, van Linkerkanaal met data van oogbewegingen.
- M21K1R : M21K, computer run 1, van Rechterkanaal met data van oogbewegingen.
- (M21K2L en M21K2R : idem run 2)

M21 vervangen door M12 levert de overeenkomstige combinaties van model M12.

\*  
\*\*  
\*\*\*  
\*\*  
\*

i









## STELLINGEN

1. Het zoeken naar één model voor de menselijke regelaar is een verkeerd uitgangspunt.  
Lit.: dit proefschrift.
2. Bij psychologisch onderzoek wordt de mens te veel bestudeerd geïsoleerd van zijn omgeving. Dit is een onjuiste begrenzing van het object van onderzoek.  
"The apparent complexity of his behavior over time is largely a reflection of the complexity of the environment in which he finds himself."  
(Simon, H.A., The Science of the Artificial. p. 25).
3. "It has become clear that complex systems are counterintuitive. That is, they give indications that suggest corrective action which will often be ineffective or even adverse in its results."  
(Forrester, J.W., Urban Dynamics. p. 9).  
Het verdient aanbeveling bij het besturen van organisaties met deze uitspraak van Forrester meer rekening te houden.
4. Er bestaat vanuit de technologie en natuurwetenschappen een groeiende belangstelling voor een beter begrip van sociale systemen. Deze ontwikkeling dient te worden aangemoedigd daar zij bijdraagt tot een verkleining van de kloof tussen theorie en praktijk in de sociale wetenschappen.

5. Als de westerse mens de doelstelling van economische vooruitgang wil opgeven teneinde het milieu te verbeteren, zal hij eerst nieuwe doelstellingen moeten formuleren.
6. Wanneer de sociale wetenschappen niet in staat blijken te zijn een bijdrage te leveren aan de oplossing van de huidige sociale problemen en ze zich blijven bezig houden met vraagstukken op kleine schaal en/of laboratorium niveau, zullen andere disciplines hun taak overnemen.
7. Omdat een onderneming te veel wordt gezien als een technisch-economisch systeem, worden bij beslissingsvraagstukken de sociale aspecten beschouwd als randvoorwaarden. Wil men echter een sociaal beleid voeren dan dient men de onderneming als een socio-technisch-economisch systeem te beschouwen.
8. In de psychologie is nog geen structuur aanwezig om de voorhanden zijnde kennis te integreren. Onder structuur verstaan we de onderlinge relaties tussen de specialismen.
9. Mensen die UFO's hebben waargenomen zijn geschikte proefpersonen bij onderzoek naar visuele fenomenen.





